



Kan ny teknik ge mindre elanvändning och mera dagsljus i grisstallar?

- del 1, dagsljusmätningar från ljustunnlar

Can new technology reduce use of electricity and improve daylight in pig houses?

– part 1, daylight measurements from light pipes

Hans von Wachenfelt, Vaia Vakouli, Alejandro Pacheco Diéguez', Niko Gentile, Knut-Håkan Jeppsson, Marie-Claude Dubois

Institutionen för biosystem och teknologi
Department of Biosystems and Technology

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:17
ISBN 978-91-576-8907-8
Alnarp 2015

FÖRORD

Mot bakgrund av den stora besparingspotentialen är det mycket angeläget att öka kunskapen om hur man erhåller energieffektiv belysning i jordbrukets driftsbyggnader men även i byggnader för humant bruk samt att bättre utnyttja dagsljuset genom ny teknik.

Det övergripande syftet var att reducera mängden elenergi för belysningsändamål i lantbrukets driftbyggnader. Detta gjordes genom att undersöka hur mycket elenergi som gick att ersätta med dagsljus samt hur djurens ljusmiljö påverkades av detta. Projektets mål var att utveckla system som med hjälp av modern teknik utnyttjar dagsljus till att skapa en bättre ljusmiljö vilken kräver mindre energi samt att ta fram underlag för datorsimulering och projektering av energieffektiv belysning där bl.a. denna teknik ingår.

Studien har finansierats av Energimyndigheten, SLO-fonden, Region Skånes miljöfond. Projektets experimentella del har genomförts tillsammans med institutionen för Energi- och Byggnadsdesign, Lunds Universitet på LBT's försöksgård i Odarslöv och har sammanställts av Hans von Wachenfelt vid Biosystem och Teknologi (BT), Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.

Projektgruppen har bestått av Marie-Claude Dubois, Niko Gentile, Jiangtao Du, samt studenterna Alejandro Pacheco Diéguez' och Vaia Vakouli från institutionen för Energi- och Byggnadsdesign, Lunds Universitet och Knut-Håkan Jeppsson, och Hans von Wachenfelt från Biosystem och Teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet, Alnarp.

Vi vill uttrycka vårt stora tack till Energimyndigheten, SLO fonden och Region Skånes Miljöfond för ekonomiskt stöd till projektet. Vi vill också tacka Mats Olsson och Thomas Nilsson för hjälp med att utföra våra mätningar, samt Jan-Erik Englund, SLU Alnarp för hjälp med statistisk bearbetning av datamaterialet.

Alnarp i maj 2015
Linda Tufvesson
Prefekt

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

| | |
|---|----|
| FÖRORD | 2 |
| INNEHÅLLSFÖRTECKNING | 3 |
| SAMMANFATTNING | 4 |
| SUMMARY | 5 |
| 1 INTRODUCTION | 6 |
| 1.1 Bakgrund | 6 |
| 1.2 Litteratur | 6 |
| 1.3 Syfte och motivering | 7 |
| 2 MATERIAL OCH METODER | 8 |
| 2.1 Försöksstallar | 8 |
| 2.2 Ljustunnlar | 10 |
| 2.3 Belysning i stallarna | 13 |
| 2.4 Mätsystem för ljus och belysningsel i stallar | 13 |
| 2.5 Nedsmutsning av sensorer | 15 |
| 2.6 Dataregistrering och beräkningar | 15 |
| 2.7 Statistisk databearbetning | 16 |
| 3 RESULTAT | 18 |
| 3.1 Antal dagsljusstimmar | 18 |
| 3.2 Skymningsrelä och nedsmutsningsfaktor | 19 |
| 3.3 Uppmätt belysningsstyrka i stallarna | 20 |
| 3.4 Ljusfördelning och dagsljusfaktor | 21 |
| 4 DISKUSSION | 24 |
| 4.1 Dagljusmängd och ljusnivåer | 24 |
| 4.2 Mätsystem | 24 |
| 4.3 Ljusfördelning och dagsljusfaktor | 25 |
| 4.4 Överväganden vid planering | 26 |
| 4.4 Slutsatser | 27 |
| 6 REFERENSER | 28 |
| APPENDIX 1. | 30 |

SAMMANFATTNING

Djurproduktionen i Sverige har en besparingspotential om 31-74 miljoner Skr per år i minskade utgifter för belysningsel. Två ljustunnelsystem, Solatube® och Velux® installerades i två identiskt lika slaktsvinsstallar för att undersöka om tillräcklig belysningsstyrka, dagsljusmängd i timmar per år och minskad elkonsumtion kunde uppnås.

Belysningskrav för grisar är minst 40 lux under minimum 8 timmar per dygn enligt EU direktiv. Jordbruksverket har dessutom krav på att grisstallar i Sverige ska ha fönster eller liknande dagsljusintag. Breda byggnader dominerar djurproduktionen, men fönster har begränsad effekt i breda byggnader då fönsterytan är relativt liten och långt borta. För växande grisar och slaktkyckling och värphöns, som är i behov av isolerade byggnader, skulle nya dagsljussystem kunna betyda ökad tillgång på naturligt ljus.

Genom tre ljussensorer erhöles kontinuerligt mätvärden från vardera stallet relativt en utomhus placerad sensor. Om ljusnivån på grisnivå understeg 40 lux mellan 08.00 – 16.00, tändes belysningen av ett skymningsrelä och mängden belysningsel registrerades. Mätdata analyserades månadsvis där villkoret för att ett värde skulle bli registrerat som dagsljusvärde var att elkonsumtionen skulle vara noll. Dagsljusfaktor mättes i en rutnät om 9 punkter och på 2 nivåer i stallarna.

Medelvärdet för den årliga mängden dagsljusstimmar var 48 respektive 55 % för Velux respektive Solatube. Solatube ljustunnlar leverade signifikant mer dagsljus än Velux. Det mest förekommande intervallet för ljusstyrkan var 0-160 lux, vilket motsvarade ca 82 och 83 % av tiden då dagsljus infångades av Velux respektive Solatube.

Skillnader erhöles i dagsljusfaktor för nivån 1,5 m över golvet. Solatube hade en mer homogen fördelning av dagsljusfaktorvärden (0,05-0,59), vilket tyder på en mer effektiv ljusspridning.

Resultaten visar att en anseelig mängd belysningsel kan sparas inom svensk djurproduktion genom användning av ljustunnlar i djurstallar. Ljustunnlar kan erbjuda energibesparing även för humant bruk i korridorer och toalettutrymmen kombinerade med dimningsbar dagsljusavkännande belysning.

Nyckelord: ljustunnel, dagsljus, ljusfördelning, grisar.

SUMMARY

The Swedish animal production have potential to save 4-9 million € per year in electric energy for lighting. Two light pipe system, Solatube® and Velux® were installed in identical pig stables to determine if required light intensity, Daylight Autonomy (DA) and reduced consumption of electricity for lighting could be met.

The of light intensity requirement for pigs are at least 40 lux for a minimum period of 8 hours/day (EU directive). According to the Swedish Board of Agriculture pig stables should have windows or other means of daylight inlets. Wide buildings dominate animal production, but windows have limited effect to bring daylight to rear spaces in deep buildings while the window area is relative small and far away. For growing animals, like pigs and poultry, needing insulated buildings, the new daylight systems could mean an increased use of natural daylight.

Three light sensors continously measured the daylight received in each stable relative to an outdoor sensor. If the horizontal illuminance at pig height went below 40 lux during 08.00-16.00, an on/off sensor turned on the lighting and the electricity consumption was recorded. Data analysis was carried out on a monthly basis, where the condition for a value to be recorded as a DA value was that the electrical consumption should be zero. Daylight Factor (DF) was measured in a 9 point grid at two levels.

The mean annual DA were 48 and 55% for Velux and Solatube respectively. Solatube light pipes delivered significantly more DA hours than Velux. The most common frequency range for both stables were from 0-160 lux, corresponding to approx. 82 and 83% of the daylight time for Velux and Solatube, respectively.

DF differencies were received at 1.5 m above floor level. Solatube had a more homogeneous DF values distribution (0.05-0.59), which implies a more effective light diffusion.

The results show that considerable electric energy savings could be achieved in animal production by use of lightpipes in farm buildings. Lightpipes could offer energy savings in corridors and toilets for humans especially if combined with dimmable daylight-linked electric lighting systems.

Keywords: light pipe, daylight, light distribution, pigs.

1 INTRODUCTION

1.1 Bakgrund

Elektrisk belysning svarar för 19 % av världens elförbrukning (EIA, 2007). Ljustunnlar erbjuder ett passivt sätt att erhålla dagsljus i mer bakomliggande utrymmen i djupa byggnader. I Sverige är dagsljus och belysning till grisar reglerat i djurskyddsförordning och EU direktiv. I den här rapporten utvärderas energibesparingspotentialen hos två kommersiella ljustunnelsystem genom att jämföra resultaten av uppmätta ljusmängder i två grisstallar utanför Lund.

1.2 Litteratur

Nästan en femtedel av elektriciteten som produceras globalt konsumeras inom belysningssektorn och ca 99 % av det globala belysningsbehovet genereras genom elektricitet med en alarmerande beräknad tillväxt om ca 40 % till år 2035. Den totala årliga kostnaden för elektrisk belysning motsvarade ca 1 % av den globala bruttoprodukten år 2006, vilket motsvarar US \$360 miljarder, där elförbrukning svarar för två tredjedelar av värdet (IEA, 2006).

I Europa svarar byggnader ensamt för ca 40 % av den totala energiförbrukningen (IEA, 2006). Enligt S Traberg-Broup (2005), kan elkonsumtionen för belysning i offentliga byggnader minskas med 50 % genom modern teknik, exempelvis genom andra ljuskällor eller genom automatisk släckning då rummet lämnas eller genom att använda dagsljus när det är tillräckligt. Liknande åtgärder inom svensk animaliproduktion skulle kunna spara 36-86 GWh, motsvarande 36-86 miljoner Skr per år vid ett elpris om 1 Skr per kWh (Edström et al., 2005; Hörndahl, 2007).

Ett av de mest uppenbara tillvägagångssätten att minska elförbrukning använd för belysningsändamål är att optimera utnyttjandet av dagsljus. Den största utmaningen för ökad dagsljusanvändning ligger i att nå djupt liggande utrymmen långt från fasaden.

Dagsljusanvändning hos människor har också visat sig öka innehavarnas sällskaplighet, välbefinnande, produktivitet och hälsa (Dehoff, 2002; Harteb Puleo & Leslie, 1991; Figueiro, 2002). Dagsljus förbättrar humör och vakenheten då den är direkt kopplad till människans dygnsrytm och har liknande effekt på många djurarter (Ashkenazy et al., 2009).

Belysningskraven för grisar är minst 40 lux under en tid om minst 8 timmar per dag enligt EU direktiv (CEC, 2001). Grisar i stallar ska ha tillgång till fönster eller liknande dagsljusinsläpp enligt Jordbruksverket (SJV, 2014).

Breda byggnader dominerar svensk djurproduktion, och i sådana har fönster dålig djupeffekt, dvs de har svårt att lysa upp de inre delarna av byggnaden med dagsljus. För växande grisar, slaktkyckling och värphöns, som behöver isolerade byggnader med innertak, skulle ljustunnlar kunna betyda ökad användning av naturligt dagsljus. Belysningen i stallarna som används i studien erhöll en medelbelysningsstyrka om 80

lux 0,85 m över golvet respektive 75 lux 0,45 m över golvet i en tidigare studie utan ljusstunnlar (Jeppsson et al., 2014).

Ljusstuvåerna i grisstallar bör främja kommunikation grisar emellan och deras möjlighet att identifiera inredningsdetaljer som utfodringstråg. Den rekommenderade ljusstuvå om 40 lux (CEC, 2001; SJV, 2014) har varken visat sig ogillad eller starkt omtyckt av grisar (Taylor et al., 2006). Det finns forskning som visar att grisens öga inte är anpassat för extremt starkt ljus (Gelatt, 1998) och att de kanske är bättre lämpade för mer dunkla ljusstuvåer av naturligt ljus (Chandler et al., 1999). Grisar föredrar att sova i dunkel belysning/mörker (2,4 lux), vilket tyder på att liggplatser i en grisbox inte bör ha alltför hög belysningsstyrka för att kunna främja vilobehovet (Taylor, 2006). Utökad dagslängd ökar födointaget hos växande grisar (Bruininx et al., 2002; Niekamp et al., 2006). En absolut fördel med naturligt dagsljus är att det medför grynings- och skymningsperioder, vilket minskar foderkonkurrens då belysningen tänds på morgonen och minskar eventuell skrämsелеffekt då ljuset tänds eller släcks.

Ljusstunnlar kan förse djupt liggande utrymmen i breda byggnader med dagsljus samt har dess naturliga ljusspektrum och dynamiska växlingar. Ljusstunnlar har fördelen av att effektivt kunna fånga ljusstrålar från solen utan att ge förhöjd värme och bländande solfläckar.

Den största nackdelen är att ljusstunnlarnas prestanda i hög grad påverkas av hur molnfri himmeln är, dvs att mycket mindre ljusstuvåer erhålls vid molniga förhållanden (Zhang & Muneer, 2000; Mohelnikova, 2009). Ljusstunnlar är därför bättre lämpade för klimat med ett överflöd av molnfria förhållanden (Nilsson, 2012), medan klimatet i Sverige har en hög andel molniga förhållanden. Proportionerna av direkt/diffus instrålning är i Sverige bara ca 1/1 (Kjellsson, 2002), vilket är ganska lågt i jämförelse med flesta andra länder.

En av de större tillverkarna av ljusstunnlar, Solatube International, Inc., uppger att utrymmen som betjänas av ljusstunnlar inte skall ha större avstånd till husets takyta än 9 meter. Deras användning är därför mycket lämplig för större envåningsbyggnader t.ex. industribyggnader eller djurstallar.

1.3 Syfte och motivering

Projektets övergripande mål var att minska elförbrukningen för belysningsändamål i lantbruksbyggnader genom att undersöka hur mycket elenergi som kunde ersättas med dagsljus samt hur djurens ljusmiljö påverkades av detta. Syftet var att bestämma effektiviteten hos ljusstunnlar och deras funktion i daglig drift i djurstallar med en miljö som resulterar i både dammig och nersmutsad utrustning.

Hypotesen var att ett dagsljussystem kan ge en tillräckligt jämn ljusmiljö med 40 lux på djurens vistelseyta under tillräckligt många dagstimmar att energibesparingen kunde betala investeringen.

2 MATERIAL OCH METODER

2.1 Försöksstallar

Ljustunnlar installerades i en byggnad på Odarslövs försöksgård, strax norr om Lund (55°45' Norr, 13°15' öster) i maj 2013. Byggnaden hade två identiska slaktsvinsavdelningar placerade vid sidan om varandra, figur 1 & 2. I stall 1, lokaliserat åt öster, installerades fyra ljustunnlar av märket Velux Sun Tunnel®. Stall 2, åt väster försågs med fyra tunnlar av märket Solatube Brighten Up® i motsvarande positioner som i det östra stallet.



a)



b)

Figur 1. Ljustunnelinsläpp via kupoler och fönster (a) ljusinsläpp (diffuser) i stallavdelning (b).

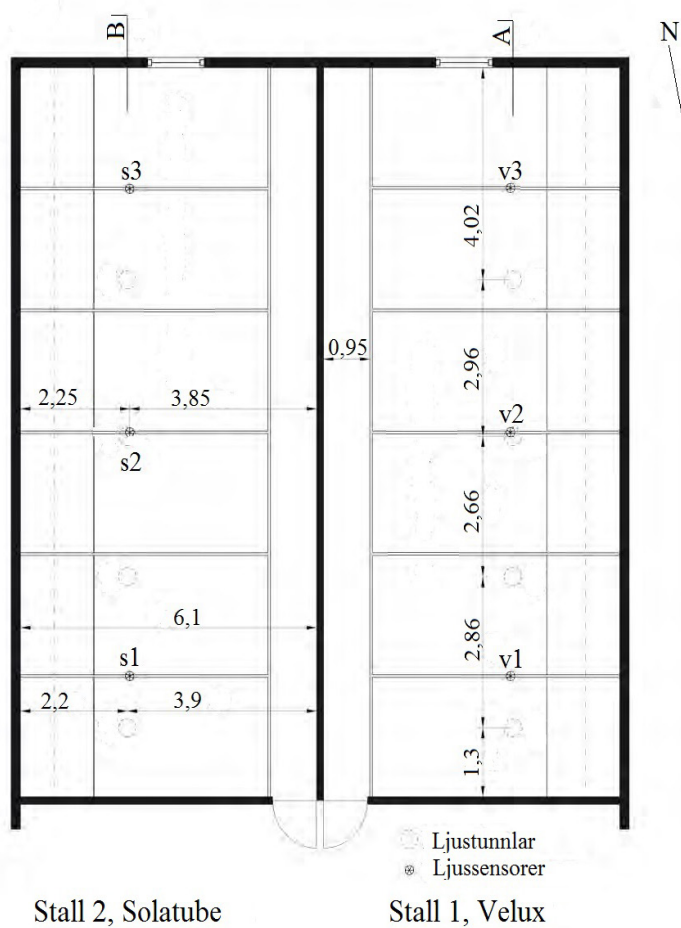
Klimatet i Odarslöv hade övervägande molniga förhållanden under året. Solståndet mitt på dagen är 11° den 21 december och 58 ° den 21 juni. Samtliga tunnlar installerades på ett sadeltak. Taket hade en nord-sydlig riktning med en lutning om 22° mot horisonten. För vart stall placerades två tunnlar på den södra takhalvan medan de andra två placerades på den norra.

En planritning över stallarna visas i figur 3. Den invändiga måtten hos stallarna var 13,8 x 6,1 m med en innertakhöjd om 3,0 m. Varje stall hade sex slaktsvinsboxar längs en inspektionsgång med plats för 15 grisar i var box samt ett fönster för dagsljus mot norr.

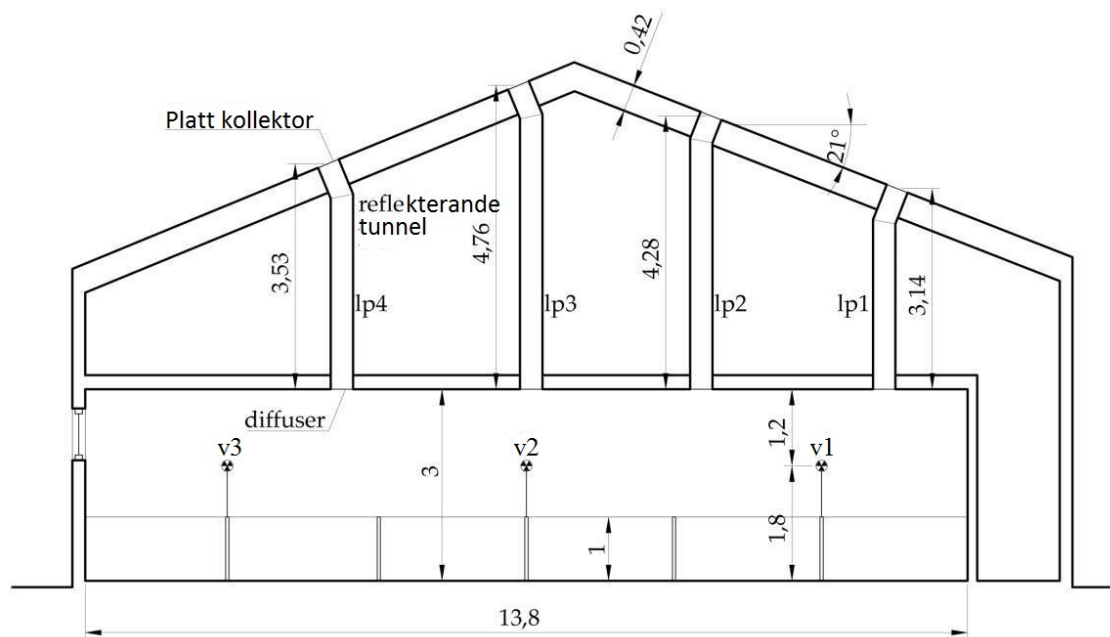
Figureerna 4 och 5 visar tvärsektioner av stallarna 1 och 2. Tre ljussensorer placerades i varje stall 1,8 m över golvytan utom räckhåll för grisarna. Sensorerna var monterade på en platta i slutet av en stolpe som i sin tur var fästad i boxmellanväggen. Ljustunnlarna korsade ett vindsutrymme ovanför stallarna på väg upp mot yttertak. Utrymmets höjd varierade mellan 1,65 m närmast fasaden till 4,7 m undernocken.



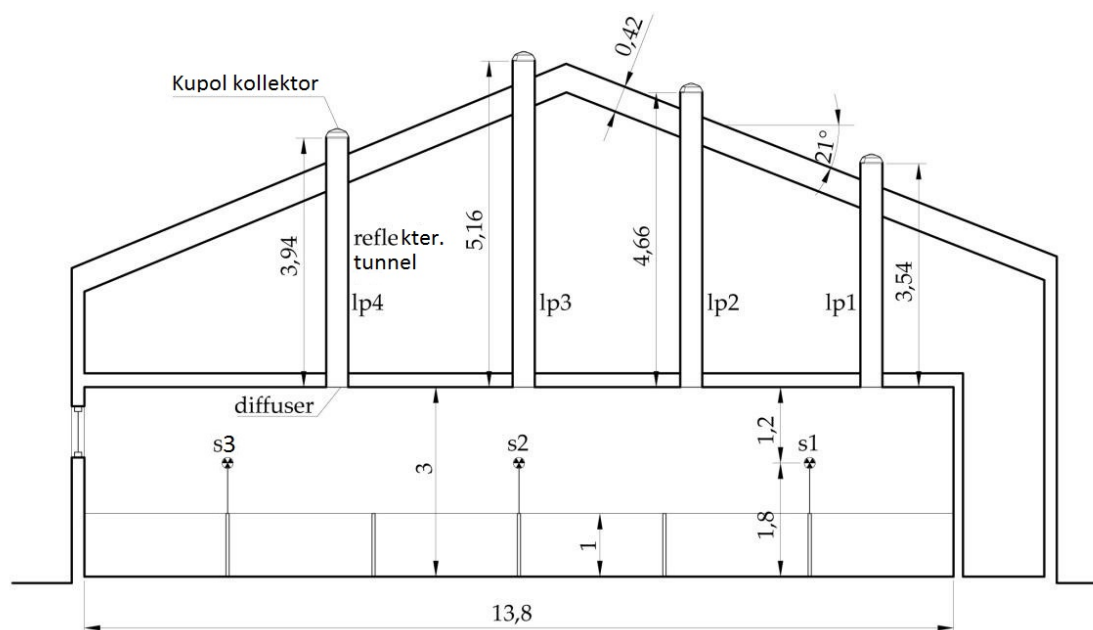
Figur 2. Odarslövs försöksstallarna från ovan.



Figur 3. Planritning över slaktsvinsstallarna på Odarslövs försöksgård. Sektionsritningarnas snitt är markerat med A respektive B.



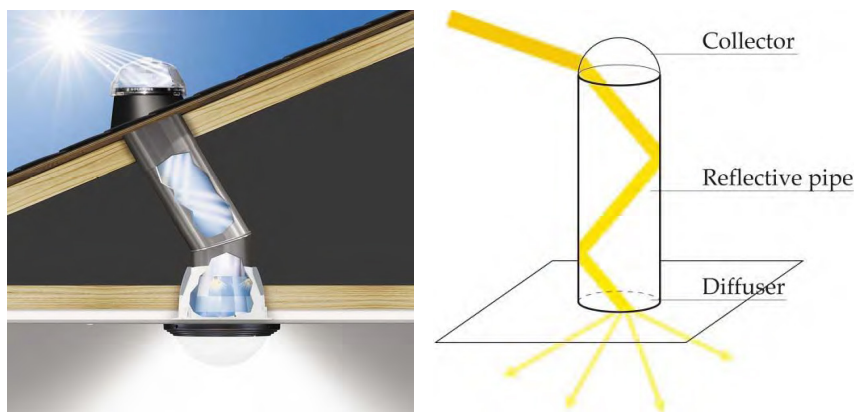
Figur 4. Sektion A (stall 1, Velux)



Figur 5. Sektion B (stall 2, Solatube)

2.2 Ljustunnlar

De ljustunnlar som använts på Odarslöv är Velux Sun Tunnel® and Solatube Brighten Up®. Ljustunnlarna består av tre huvudkomponenter: kollektorn, den reflekterande tunneln och diffusern, figur 6. Tabell 1 visar de optiska egenskaperna hos de båda ljustunneltyperna.



Figur 6. Skematisk presentation av Solatube ljusstunnel (källa: Solatube websida).

Tabell 1. Optiska egenskaper hos de undersökta ljusstunnelmodellerna.

| Komponenter & optiska egenskaper | Velux Sun Tunnel® Fast krök, Ø 35 cm % | Solatube Brighten Up® 290 DS, Ø 35 cm % | Källa |
|----------------------------------|--|---|--|
| Kollektor typ & ljusöverföring | Platt 87 | Kupol 92 | Data från tillverkande företag: Velux® och Solatube® |
| Ljusreflektans tunnel | 98 (6 % diffus) | 99 (fullt speglande) | |
| Ljusöverföring diffuser | 81 | 92 | |
| Ljusreflektans deflektor | - | 99 (fullt speglande) | |

2.2.1 Kollektor

Kollektorn är en transparent beståndsdel lokaliserad vid den yttre öppningen på tunneln. Dess huvudsyfte är att fånga in dagsljus och skydda ljusstunneln från påverkan av väder och nedsmutsning. Den är vanligtvis utförd av något starkt ljusgenomsläppligt material, och kan vara platt eller kupolformad. I det här fallet är ljusstunnlarna i stall 1 (Velux) försedda med en platt kollektor medan de i stall 2 har en kupolformad kollektor, fig 7. Den platta kollektorn hos Velux består av enkel klarglasruta fastsatt vid ljusstunnelns övre öppning.

Den kupolformade kollektorn hos Solatube är formgjuten betående av variabla optiska prismor som kan rikta om ljusstrålarna vid låg solvinkel in i tunneln. Denna egenskap har visat sig höja ljuseffektiviteten hos ljusstunneln vid tillfällen då solen står lågt (Zhang et al., 2002; Lo Verso et al., 2011). Detta är en förtjänstfull egenskap för de Skandinaviska länderna. Emellertid dominerar molnigheten under vintern, då solen står som lägst, vilket kraftigt begränsar fördelen av att använda detta system. Förutom att optimera insamlingen av ljusstrålar brukar den här typen av kupolformade kollektorer begränsa ljusstrålar från sol vid högre solvinkel för att undvika visuellt obehag (bländning) av solfläckar. I det här fallet är så höga solvinklar obefintliga, vilket kan göra detta särdrag rätt ofördelaktigt, då det blockerar delar av den diffusa ljuset från himlen.



Figur 7. Solatube kupolformade kollektor med reflektor (källa: Solatube websida).

Solatubes kollektorkupol är utrustad med en ljusreflektor, vilken kan klassas som ett optiskt omriktningssystem (ORS). Det är en laserskuren spegel inuti själva kupolen som är orienterad mot ekvatorlinjen. Dess syfte är att omdirigera lågt infallande ljusstrålar in i ljustunneln. Förmågan för ljus vid låga solvinklar (lägre än 60°) att tränga igenom är på så vis ytterligare förstärkt (Lo Verso et al., 2011; Edmonds et al., 1995). Detta kan vara en fördel i södra Sverige där solvinkeln mitt på dagen varierar mellan 11 och 58° . Dock blockerar ljusreflektorn delvis genomträngningen av diffust ljus från norr. Detta är en kritisk detalj för skandinaviska förhållanden där diffus instrålning står för omkring 50% av den totala årliga instrålningen (Khellsson, 2002). Det kan tilläggas att den nordligaste av ljustunnlarna i stall 2 (lp4) inte försågs med ljusreflektor då direkt solljus blockeras av taketsnock under mesta tiden av året.

2.2.2 Reflekterande ljustunnel (RLT)

RLT är tunneln som transporterar dagsljus från kollektorn till diffusern. Dess design och optiska egenskaper är optimerade för att minimera ljusförluster. I det här fallet, har de båda undersökta ljustunnelmodellerna en cirkulär tvärsnitt, då detta är den vanligast förekommande formen på marknaden. Dock rekommenderar vissa studier rektangulär tvärsektion, vilket förbättrar systemets prestanda vid låga solvinklar (Swift, 2010).

Den ljusreflekterande egenskapen hos RLT, dvs. dess starkt speglande reflektans, är dess viktigaste (vanligen över 98%) då de fungerar bäst vid solsken. En liten nedgång i reflektans har stor betydelse för kapaciteten på grund av det stora antalet ljusstudsar inom tunneln. Detta förklaras av att då reflektansen hos de omslutande ytorna är hög ökar det inbördes reflekterande ljuset i hög grad ytans ljusstyrka.

En annan viktig faktor för ljustunnlarnas kapacitet är dess bredd-höjd förhållande. Denna bestämmer mängden ljusstudsar i ljustunneln. Det rekommenderade förhållandet är $< 1/10$ och enligt vissa författare bör det aldrig överstiga $1/20$ för att nå ett minsta ljusmängd (Mohelnikova, 2009). Bredd-höjd förhållandet för de installerade ljustunnlarna var $1/9$ till $1/15$. Tvärsnittet bör aldrig understiga 200 mm för att undvika orimligt stora ljusförluster. I det här fallet hade båda systemen en diameter om 350 mm .

2.2.3 Diffuser

Ljustunneldiffusern är installerad i taket av de rum som ska lysas upp och har vanligen formen av en oval kupol eller en platt polykarbonatplatta. Tillsammans med solhöjden

avgör diffusern ljusmängden och dess distribution från en ljusstunnel (Mohelnikova, 2009).

Den utgående ljusdistributionen påverkas av form och beskaffenhet eller mönster hos diffusern. Platt diffuser ger en smallare ljusstråle medan en konvex form tillåter mer vidvinklat diffust ljus (Zhang, et al., 2002). Å andra sidan, är den totala ljusmängden från en platt diffuser ca 10-12% högre än från en kurvformad (Robertson et al., 2010). En Fresnel diffuser är en tvåkomponents diffuser vars konstruktion ligger mittemellan de tidigare typerna. De är speciellt fördelaktiga vid klar himmel och har endast måttliga nackdelar för diffust infallande ljus. De är utrustade med ett diffust mittparti med en klar kantyta runt om mittpartiet (Kocifaj, 2009). Att belysa vertikala ytor kan förstärka uppfattningen av ljushet i ett utrymme. Diffusern hos ljusstunnlarna i grisstallarna är platta och prismaformade. Solatube's diffuser ser ut att ge en bredare ljusstråle jämfört med Velux.

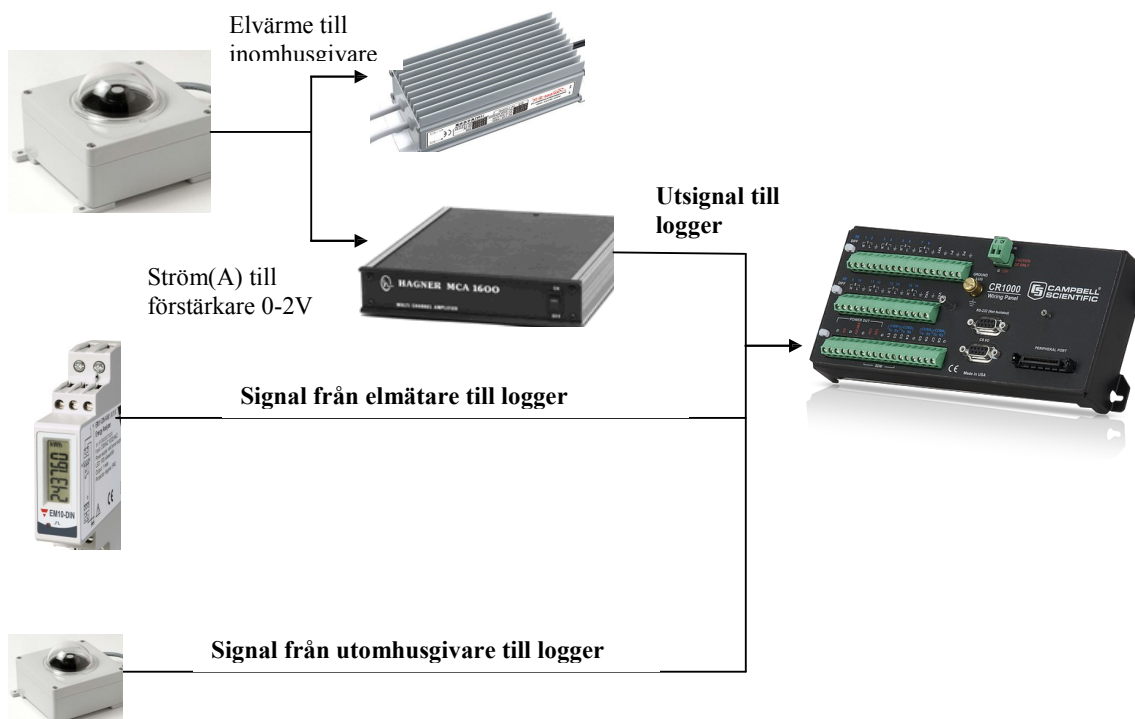
2.3 Belysning i stallarna

Varje stallavdelning hade tre takmonterade lysrörsarmaturer (2 x 36 W, T5 Malmbergs Alpha, Sverige). Dessa manövrerades av ett automatiskt skymningsrelä som höll belysningen tänd endast då dagsljuset var otillräckligt, dvs. om det understeg 40 lux mellan 0800 och 1600 (CEC, 2001; SJV 2014). Eftersom tröskelvärde var så lågt skulle en placering av reläets sensor inuti stallet ha genererat en kontinuerlig svängning mellan till- och frånslag. Därför placerades dessa sensorer på vindutrymmet ovanför stallarna, ett utrymme utan direkt ljusinstrålning. Reläets tröskelvärde ställdes in (potentiometer) genom att beräkna ljusförhållandet mellan sensorns placering och en representativ plats i stallet. Reläet hade en justerbar tidsfördröjning för att slå om, för att undvika ideliga omslag, och denna ställdes in på en minut.

2.4 Mätssystem för ljus och belysningsel i stallar

Ett mätssystem bestående av inomhus och utomhussensorer och elmätare användes för att kontinuerligt mäta ljusstyrkan i stallavdelningarna och utomhus samt elkonsumtionen från belysningen (Gentile et al., 2012). Mätdata registrerades av en logger i ett närliggande utrymme intill stallarna, se figur 2 och 8. Ljussensorernas påverkan från stallfönstrens dagsljus var lika för bägge stallavdelningarna.

Mätssystemet bestod av tre ljussensorer som mätte horisontellt ljus invändigt i varje stall och en ljussensor för utomhus ljusinstrålning figur 9. Ljussensorerna inomhus (Hagner SD2 Light Sensor, B. Hagner AB, Sweden) var placerade på de boxavskiljande väggarna på en höjd om 1,8 m från golvet längs en centrumlinje genom grisboxarna med ett mätområde om 0-2 000 lux, figur 4 och 5. Utomhussensorn (Hagner ELV-841 Light Sensor, B. Hagner AB, Sweden) placerades i en omgivning utan hinder söder om stallarna med ett mätområde om 0 – 200 000 lux. För att kunna motstå miljön i stallarna utrustades sensorerna med vattentät, uppvärmt hölje för att undvika kondensbildning och frost på ytorna orsakat av låga temperaturer utomhus och i stallarna.



Figur 8. Skiss över data insamlingssystemet.

Samtliga sensorer hade kalibrerats av Hagner AB innan leverans och hade en angiven noggrannhet om $\pm 3\%$. Både inomhus- och utomhusmätarna genererade en utsignal i volt som skickades till loggern. Ett skymningsrelä (Turnus 771, Grässlin GmbH, Bundesstrasse 36, 78112 St. Georgen, Tyskland) reglerade till- och frånslag av belysningen då ljusstyrkan under- respektive överskred tröskelvärdet om 40 lux. Elförbrukningen registrerades av en elmätare med en utsignal om 1000 pulser/kWh till loggern.

Dataloggern (CR 1000, Campbell Scientific Inc. Logan, Utah, USA) fick en signal från de olika sensorerna var 10 sekund, och dessa signaler användes för att beräkna ett periodiskt medelvärde var 6 minut och var timme.



Figur 9. Hagner SD2, inomhussensor placerad 1,80 m över golvytan i stallet.

2.5 Nedsmutsning av sensorer

Nedsmutsningen av sensorer beräknades för att ta hänsyn till hur stor smutsmängd som ansamlades på sensorerna i stallarna. Grisar orsakade en påtaglig mängd damm och smuts på sensorernas kupoler. Efter rengöring ansamlades damm och smuts på sensorerna tills de blev rengjorda av personalen igen. Sensorerna rengjordes dagligen med dammvippa och torkades av med våt trasa en gång per vecka.

Nedsmutningsfaktorns beräknades genom att använda 2014-02-12 som referensdatum, då sensorerna blivit ordentligt rengjorda. För övriga dagar valdes en tidpunkt som motsvarade de dagsljusnivåer som gällde den 12 februari kl. 09.18. Vid detta tillfälle bestämdes ljusförhållandena av att belysningen var på, samt att dagsljusnivåerna utomhus var låga (8 081 lux). Liknande tillfällen valdes sedan ut för de dagar som nedsmutningsnivån skulle beräknas för, där beräkningen utfördes enligt följande formel:

$$SSF_{dag\ x} = \frac{E_{referens}}{E_{dag\ x}}$$

$SSF_{dag\ x}$ är nedsmutningsgraden en bestämd dag

$E_{referens}$ är den avlästa ljusstyrkan från sensorn vid referenstidpunkten (2014-02-12, kl 09:18, med tillslagen belysning och dagsljus utomhus 8 018 lux)

$E_{dag\ x}$ är den avlästa ljusstyrkan från sensorn den valda dagen vid ett tillfälle då belysningen var tillslagen och dagsljuset utomhus var ca 8 018 lux.

2.6 Dataregistrering och beräkningar

Mätningarna genomfördes under perioden september 2013 till december 2014. Den 13-11-27 upptäcktes att den yttre givaren inte fungerade. Denna ersattes av en ny givare 13-12-17. Resultaten från mätningarna presenterades som periodiskt medelvärde var 6 minut, med datum och tid, mätningsnr., registrerad ljusstyrka hos 6 sensorer i stallarna, elförbrukning per stallavdelning samt ljusstyrka hos utomhussensor. 3-D mätningar av ljusspridning i stallarna och dagljusfaktor utfördes då stallarna var tömda på grisar.

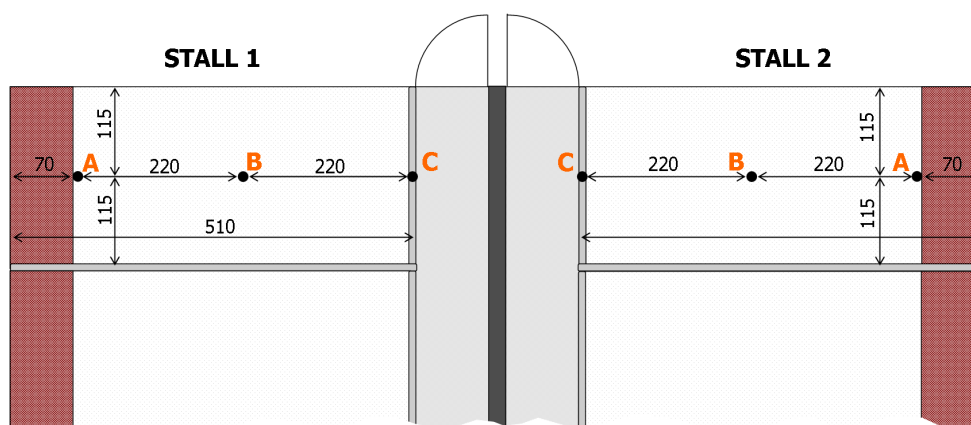
Från mätvärdena beräknades den procentuella mängden dagsljusstimmar (dagsljusautonomi, DA) under året, dvs hur stor del av tiden som den elektriska belysningen inte behövde användas eller hur stor energibesparingen var genom dagsljusanvändning.

Beräkningarna utfördes separat för varje stall och ljusstunnelsystem månadsvis. Genom en villkorsfunktion har endast mätvärden som registrerats dagtid, dvs mellan 0800-1600 vintertid respektive 0700-1500 sommartid använts. För att ett mätvärde skulle registreras som ett dagsljusvärde var villkoret att elförbrukningen skulle vara noll. För att även få med dagsljusvärden då skymningsreläets tidsfördröjning oimintetgjorde dess registrering, tillfogades ytterligare ett villkor. Om mätvärdet från utomhussensorn var högre än 15 000 lux skulle värdet registreras som dagsljusvärde. De sistnämnda värdena registrerades som potentiella dagsljusvärden. Som kontroll registrerades antal mätvärden per månad samt totala antalet mätningar.

För att få fram ett underlag till sensorernas nedsmutningsfaktor utfördes en beräkning med underlag från de 3 först månaderna under 2014. Kriterierna för de ingående värdena var de som beskrivits ovan under avsnittet 'Nedsmutning av sensorer'. Faktorn beräknades i medeltal till 1,2 (n = 90).

Ljusstyrkan i djurnivå beräknades för varje stall månadsvis till ett medelvärde både då belysning var tillslagen och enbart för dagsljus. Även denna beräkningen utfördes genom sortering av data från ursprungsmatrisen och var villkorad till dagtid. Beräkningen för belysning och dagsljus utfördes var för sig. Mätvärdet sorterades som belysningsvärde om elförbrukningen var större än noll. Belysningsvärdet gällde för sensorns placeringshöjd och för att få belysningsvärdet storlek i djurnivå 0,7 m över golvet, dividerades värdet med en faktor 2,25 (kvot mellan uppmätt värde vid sensor och vid 0,7 m höjd). Hänsyn togs även till nedsmutningsfaktorn genom multiplicering med faktorn 1,2. För få fram dagsljusvärdet utfördes motsvarande beräkning.

3-D mätningar av ljusspridningen i stallarna och mätning av dagsljusfaktorn, bestämdes vid mätningar utförda i juni och november 2013. Referenspunkter i ett 9 punkters rutnät valdes att representera ljusmiljön i stallarna. Dessa punkter erhöles dels dagsljus från ljusstunnlarna dels från ett gavelfönster. Rutnätet definierades både vid golvnivå och 1,5 m över golvnivå, figur 10. Samtidigt med mätningarna i stallarna utfördes mätning av ljusstyrkan utomhus.



Figur 10. Planritning som illustrerar mätpunkternas placering i stallarna. Totalt utfördes mätningar i 3 av 6 grisboxar per stall, dvs i ett rutnät om 9 punkter per stall, på golvnivå och på 1,5 m över golvnivå.

Definitionsmässigt bör dagsljusfaktorn (DF) beräknas som förhållandet mellan ljusstyrkan inomhus (E_i) och utomhus (E_o) under de förutsättningar om molnig himmel som definieras av CIE (2003), enligt nedan, där värdena bör mätas samtidigt inomhus och utomhus:

$$DF = \frac{E_i}{E_o} \cdot 100$$

2.7 Statistisk databearbetning

För att undersöka om det fanns någon skillnad i erhållen mängd dagsljus från de olika ljusstunnelsystemen användes en t test, där de erhållna värdena för den procentuella

mängden dagsljusjustimmar delades upp i en parvis jämförelse per månad för de två stallarna. Datamaterialet testades för normalfördelning och en statistisk signifikansnivå om 5 % användes i analysen som utfördes i Minitab™ (Minitab, 2007).

En variansanalys utfördes för varje höjd i stallet i PROC GLM (SAS Institute Incorp. 2003) för att bestämma om det fanns någon skillnad i dagsljusfaktor beroende på ljustunnelsystem och mätplats i stallarna. Den statistiska modellen var en split-plot med mättillfället som blockeffekt, stall som huvudeffekt och plats som split-plot-effekt..

Den statistiska modellen var följande

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + b_j + \delta_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

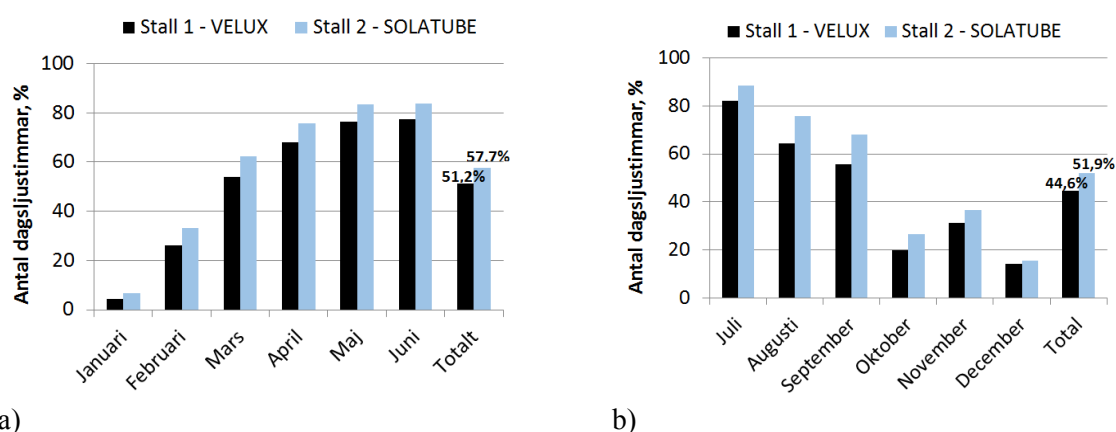
där μ = behandlingsmedelvärde, α_i = stall, b_j = slumpvis effekt av mättillfälle, γ_k = plats, ε_{ijk} = fel term, i = stall (1, 2), j = mättillfälle (1, 2, ..., 8), och k = plats (1, 2, ..., 9).

En statistisk signifikansnivå om 5 % användes i analysen, där Tukey's metod användes för att skilja medelvärden. Resultaten presenteras som medelvärden.

3 RESULTAT

3.1 Antal dagsljusstimmar

Beräkning av den procentuella mängden dagsljusstimmar (DA) under året som ljusstunnlarna levererade mer än 40 lux i stallarna mellan kl. 8-16, utfördes månadsvis under 12 månader för de två stallarna baserat på mätvärden från mätsystemet. Antal mätvärden/mån var 7 439 i januari och 6 719 i februari. Dagsljusmängderna var låga, under 10 % under januari för att snabbt öka till över 50 % under mars månad för bägge ljusstunnelsystemen. För vårmätningarna uppgick DA till ca 51 och 57 % för Velux respektive Solatube och på hösten 45 och 52 % (figur 11). Den totala mängden dagsljusstimmar samt energiförbrukningen genom elektrisk belysning framgår månadsvis i tabell 3.



Figur 11. Antal erhållna dagsljusstimmar baserade på mätresultat under januari till juni månad hos ljusstunnelsystemen i de två slaktsvinstallarna på Odarslöv norr om Lund (55°45' norr, 13°15' öst).

Resultatet av en parvis jämförelse av procentuella mängden dagsljusstimmar under året som ljusstunnlarna har levererat i stallarna, mellan kl. 8-16 visade att ljusstunnelsystemet Solatube hade signifikant fler dagsljusstimmar än Velux, tabell 2. Datamaterialet var normalfördelat.

Tabell 2. Parvis jämförelse av dagsljusmängden per månad hos de två olika ljusstunnelsystemen baserat på mätresultat från ljussensorerna under 12 månader (antal prov (n), medelvärde och standardavvikelse (SD)).

| Mät-punkter ^a | Stall 1, Velux | | Mät-punkter | Stall 2, Solatube | | p ^b |
|--------------------------|----------------|---------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------|----------------|
| | n | Dagsljusmängd, % Medelv (SD) | | n | Dagsljusmängd, % Medelv (SD) | |
| v1, v2, v3 | 12 | 47,81 (27,23) | s1, s2, s3 | 12 | 54,69 (29,16) | *** |

^{a)} Mätpunkter enligt figur 3

^{b)} Signifikansnivå vid parvis jämförelse av mätpunkter: * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$; ns = ej-signifikant.

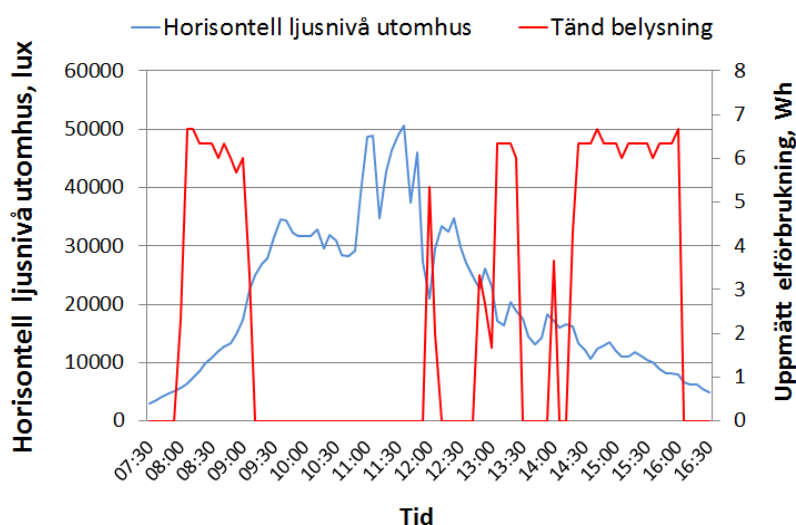
Tabell 3. Antal timmar med dagsljus samt elektrisk belysning i stallarna månadsvis.

| Månader | Stall 1, Velux | | Stall 2, Solatube | |
|---------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | Dagsljus-timmar (h) | Elektrisk belysning (h) | Dagsljus-timmar (h) | Elektrisk belysning (h) |
| Januari | 11 | 237 | 17 | 231 |
| Februari | 58 | 166 | 75 | 149 |
| Mars | 134 | 144 | 154 | 94 |
| April | 164 | 77 | 181 | 59 |
| Maj | 189 | 59 | 207 | 41 |
| Juni | 186 | 54 | 201 | 39 |
| Juli | 203 | 45 | 220 | 28 |
| Augusti | 160 | 88 | 188 | 60 |
| September | 133 | 107 | 163 | 77 |
| Oktober | 49 | 199 | 66 | 182 |
| November | 75 | 165 | 88 | 152 |
| December | 36 | 212 | 38 | 210 |
| Totalt | 1398 | 1522 | 1598 | 1322 |

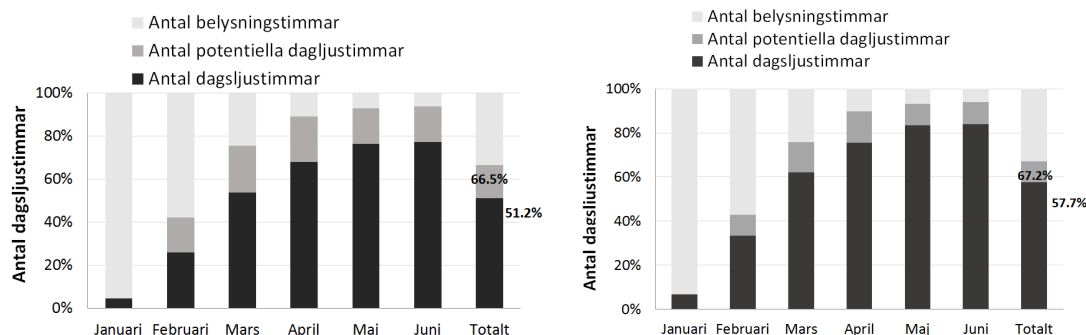
Användning av ljusstunnlar i energibesparingssyfte ger generellt en ekonomisk vinst i moderna produktionsbyggnader vid 10 års avskrivningstid och ett elpris om 1,35 kr/kWh, baserat på uppmätta dagsljusstimmar.

3.2 Skymningsrelä och nedsmutningsfaktor

Skymningsreläets funktion under en dag visas genom mätvärden (6 minuter medelvärden) från sensor sl i figur 12. Vid analys av mätvärdena framgick att den inbyggda tidsfördröjningen i skymningsreläets funktion medförde en reducering i mängden registrerade dagsljusstimmar per dag. Den potentiella dagsljusmängden där hänsyn tagits till beräkningsvillkoret 15 000 lux från utomhussensorn och nedsmutningsfaktorn framgår av figur 13.



Figur 12. Illustration av skymningsreläets funktion den 14 mars. Kl. 08.00 är ljusnivå från ljusstunnlarna otillräcklig och belysningen är tänd. Klockan 09.15 har ljusnivå stigit tillräckligt för att reläet ska släcka belysningen.

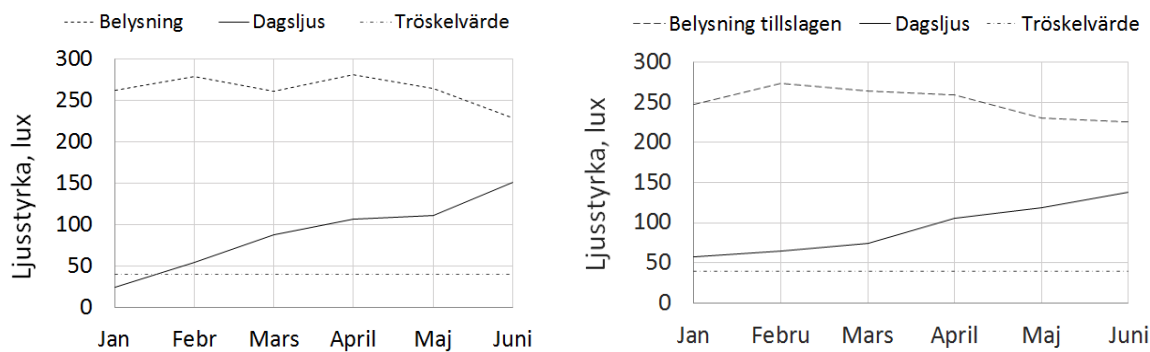


a) b)
 Figur 13. Antal potentiella dagsljusstimmar för a) stall 1, Velux och b) stall 2, Solatube då mätresultaten är kompenserade för tidsfördröjning hos skymningsreläet och nedsmutsning av sensorer, januari till och med juni.

3.3 Uppmätt belysningsstyrka i stallarna

Medelljusstyrkan i stallarna är baserad på de kontinuerliga mätningarna (ca 7500 per månad), där mätvärdena är korregerade för reläets tidsfördröjning och nedsmutsningsfaktor samt omvandlade från sensor s1 nivå till grisnivå genom en faktor 2.25.

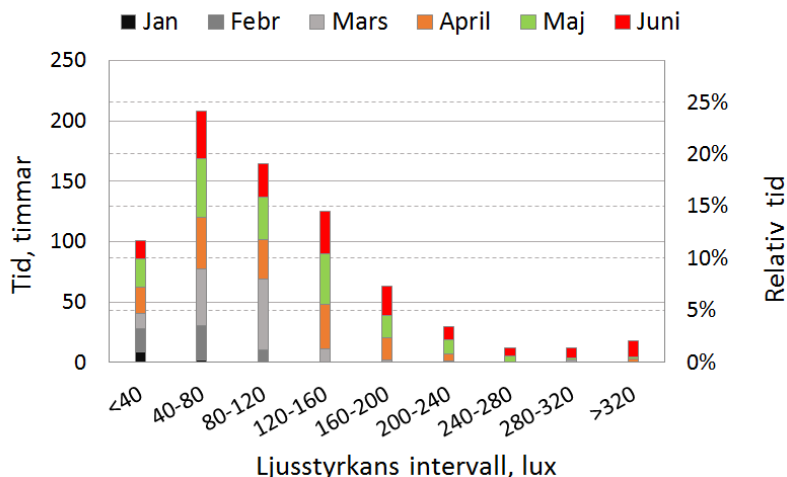
Figur 14 visar att dagsljuset i stall 1 understiger belysningsbehovet under första delen av januari månad, vilket inte inträffar i stall 2. Dagsljusnivån ökar stadigt i stall 1 till 150 lux, medan ökningen hos stall 2 är något mindre under första halvåret. Ljusstyrkan från belysningen håller en förhållandevis jämn nivå men avtar något under april - juni månad då dagsljusandel ökar.



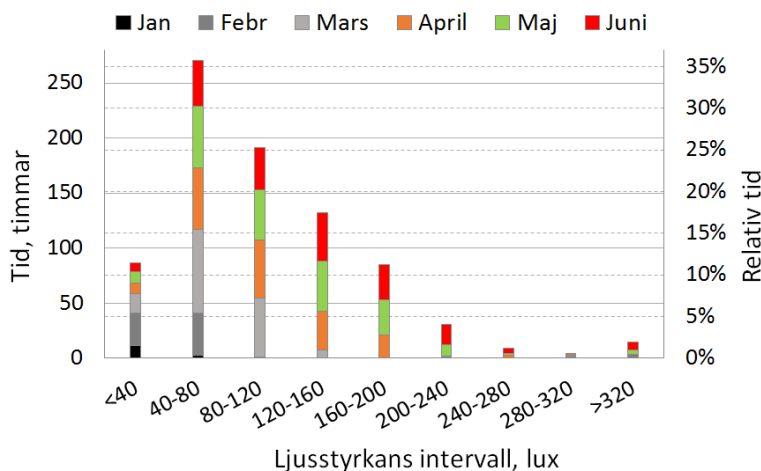
a) b)
 Figur 14. Beräknad medelljusstyrka i stallet baserad på mätning av belysningsstyrka (n ca 7500/mån.), dels från ljustunnel, dels från artificiell belysning mellan kl. 8-16 under januari till juni månad, där gränsvärdet 40 lux = streckad linjeför stall 1, Velux (a) och stall 2, Solatube (b).

För att få en uppfattning om vilka dagsljusnivåer som uppkommer i stallarna mellan kl. 0800-1600 har ljusstyrkans frekvensfördelning beräknats 0,7 m över golvet (grisnivå) under januari till juni månad för sensor v1 och s1 i figur 15 och 16. I januari är ljusnivåerna ofta under 40 lux för att sedan snabbt stiga under februari. Andelen under 40 lux avtar sedan under resterande månaderna. Den stora ökningen sker däremot i ljusstyrkeintervallet 40-80 och 80-120 lux för att avta i de övre ljusstyrkeintervallen.

Generellt fångar stall 1 fler dagsljusstimmar lägre än 40 lux, medan stall 2 har högre frekvens av fångade dagsljusstimmar inom de högre ljusstyrkeintervallen. Det mest frekventa området 0-160 lux hos bägge stallarna, motsvarar ca 82 respektive 83 % av den tid då dagsljus fångas av Velux respektive Solatube.



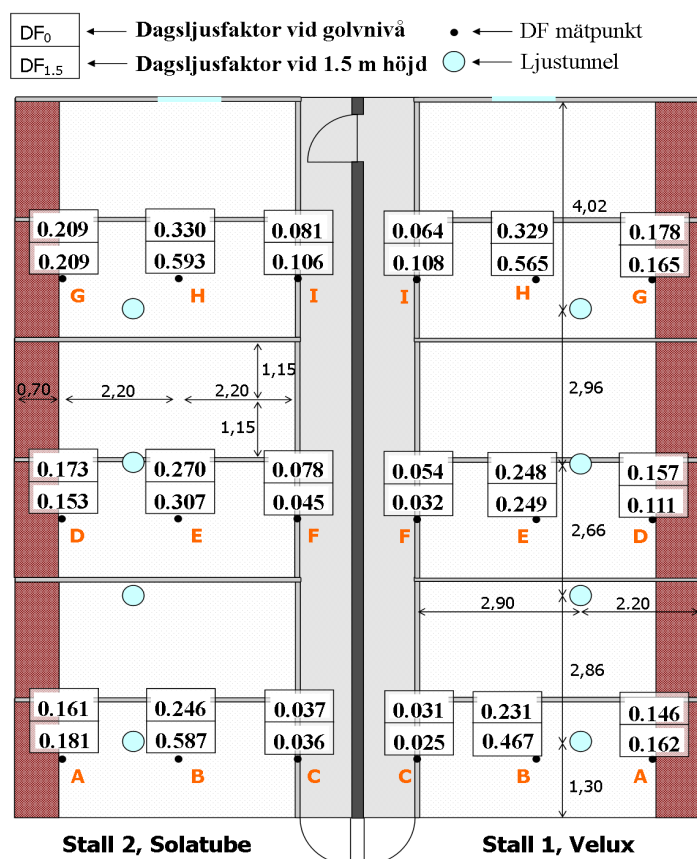
Figur 15. Dagsljus – belysningsstyrkans frekvensfördelning 0,7 m över golvnivån grundat på mätresultat från Velux ljusstunnel mellan kl. 08-16 under januari-juni månad.



Figur 16. Dagsljus – belysningsstyrkans frekvensfördelning 0,7 m över golvnivån grundat på mätresultat från Solatube ljusstunnel mellan kl. 08-16 under januari-juni månad.

3.4 Ljusfördelning och dagsljusfaktor

Mätningar av ljusfördelning och dagsljusfaktor utfördes den 26 juni och 27 november 2013. Ljusnivån utomhus varierade, speciellt under några mätningar, fastän himmeln var totalt molntäckt. Därför användes endast 5 av 9 mättillfällen för dagsljusfaktorberäkning vid junimätningen. Förutsättningarna var bättre under novembermätningarna och medelvärde samt standardavvikelse beräknades för samtliga mätningar (n=96), figur 17.



Figur 17. Medelvärde för dagsljusfaktorn i stall 1 = Velux och stall 2 = Solatube från mätningarna utförda i juni och november (n=96) på golvnivå (överst) och 1,5 m över golvnivå (nedersta rutan för var mät punkt).

Ljushöjden och dagsljusfaktorn styrdes i stor utsträckning av ljusstunnelarnas placering, dvs ljushöjden var som högst nära ljusstunnelarnas centrumlinje, dvs där djurens utfodring var placerad, för att avta ju längre avståndet blev till linjen. Ljushöjden var som lägst utmed inspektionsgången, dvs där djuren hade sin avträdesplats.

Resultatet av en parvis jämförelse av belysningen från ljusstunnelarna i mät punkterna belägna 1.5 m över golvnivå framgår av tabell 4. Statistisk signifikanta skillnader erhöles för 4 st punkter 1.5 m över golvnivå men inte för mätningar på golvnivå. Standardavvikelsen var genomgående låg för mätningarna, något lägre för Solatube än för Velux.

Placeringen av mät punkterna A, D och G i förhållande till ljusstunnelarna beräknades från figur 3, 4, och 5, där samtliga befann sig 1,5 m i sidled från ljusstunnelarna och 0,5 m ovanför boxinredningen. I längsled var punkt A belägen rakt under ljusstunnel 1, punkt D var 1,15 m från ljusstunnel 3 och 1,51 m från ljusstunnel 2 samt punkt G var 0,55 m från ljusstunnel 4 och 3,5 m från fönster, figur 18.

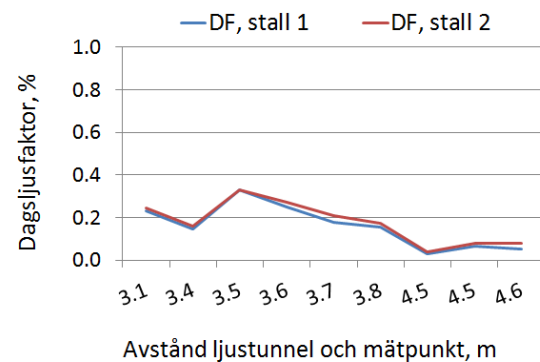
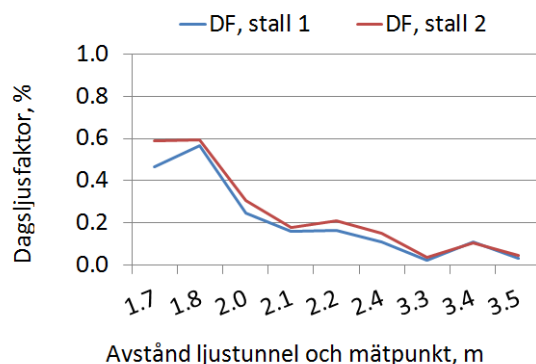
Generellt hade Solatube högre jämförbara dagsljusfaktorvärden vilket med hänsyn till mät punkternas varierande avstånd till ljusstunnelarna skulle innebära att Solatube har en effektivare ljusfördelning/spridning i rummet.

Tabell 4. Parvis jämförelse av dagsljusfaktorn i nio mätpunkter för respektive stallavdelning 1,5 m över golvnivå (antal prov (n), medelvärde och standardavvikelse (SD)).

| Mät- punkter ^a | Stall 1, Velux | | Stall 2, Solatube | | |
|------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|
| | n | Dagsljus faktor Medelv (SD) | n | Dagsljus faktor Medelv (SD) | p ^b |
| A | 8 | 0,16 (0,01) | 8 | 0,18 (0,02) | ** |
| B | 8 | 0,47 (0,06) | 8 | 0,59 (0,03) | * |
| C | 8 | 0,03 (0,01) | 8 | 0,04 (0,00) | ns |
| D | 8 | 0,11 (0,01) | 8 | 0,15 (0,01) | ** |
| E | 8 | 0,25 (0,04) | 8 | 0,31 (0,01) | ns |
| F | 8 | 0,03 (0,01) | 8 | 0,05 (0,00) | ns |
| G | 8 | 0,16 (0,02) | 8 | 0,21 (0,01) | * |
| H | 8 | 0,56 (0,10) | 8 | 0,59 (0,06) | ns |
| I | 8 | 0,11 (0,03) | 8 | 0,11 (0,00) | ns |

a) Mätpunkter enligt figur 10.

b) Signifikansnivå vid parvis jämförelse av mätpunkter: * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; ns = ej-signifikant.



a) b)
Fig. 18. Dagsljusfaktor i relation till avstånd mellan ljusstunnel och mätpunkter a) 1,5 m över golvnivå och b) vid golvnivå för stall 1, Velux and stall 2, Solatube.

4 DISKUSSION

4.1 Dagljusmängd och ljusnivåer

Resultaten från dagsljusmätningarna visade att ljustunnlar kan erbjuda en energibesparande dagsljusmiljö utan kallras för djur med lågt eller reducerat ljusbehov som slaktgrisar, slaktkyckling och värphöns.

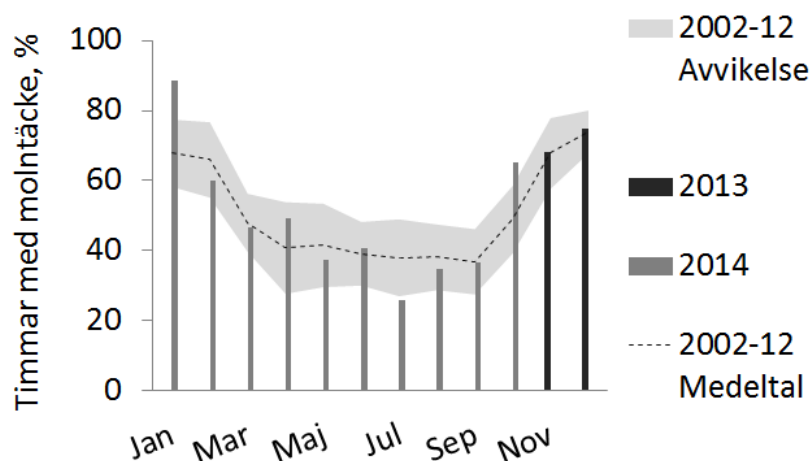
Solatubes ljustunnlar visade högre ljusutbyte och därmed högre energibesparing än Velux. Detta beror säkert på många faktorer som: raka tunnlar, högre tunnelreflektans, högre spekulär reflektans, högre överföring av ljusstrålar från kollektor och diffuser och kollektorkupolen.

Antalet registrerade dagsljusstimmar berodde i det här fallet på det relativt lågt satta tröskelvärde om 40 lux. Med ett tröskelvärde högre än 40 lux skulle den mest frekventa ljusintensitetsområdet ha legat mellan 40-160 lux, motsvarande 68 till 72 % av den dagsljusinfångande tiden för Velux respektive Solatube. Detta ljusintensitetsområde (100 lux) skulle kunna vara användbart som orienteringsljus vid lägre solhöjder med kompletterande belysning i korridorer och toaletter, samt ge fullt dagsljusbelysning vid högre solhöjder under 6 månader (Tregenza et al., 2011), fig 14. Allt som allt, skulle detta betyda en årlig medeldagsljusmängd om 33-37% för Velux respektive Solatube, beräknat för 0,7 m över golvnivå.

4.2 Mätsystem

Mätsystemets provtagningsfrekvens tycks ha varit relevant för den höga variation som finns hos norra Europas molndominerande himmel (Zhang et al., 2002; Danny et al., 2010). Om dataloggerns periodiska medelvärde både beräknats för var minut och för var sjätte minut skulle förmodligen ett mer detaljerat mått på molnens variation erhållits. Den registrerade medelljusnivån i figur 14 är i nivå med erhållna ljustunnelmätningar i Storbritanien (Zhang et al., 2002), utförda med ungefär samma tunnellängd och diameter samt placering av mätpunkter. Graden av molntäcke under mätperioden 2013-2014 överskred den normal avvikelser under januari, juli och oktober, med högre grad av molntäcke i januari och oktober men med lägre i juli, figur 19. Förutom januari, tycks skillnaderna under mätperioden utjämnas till att motsvara ett normalår.

Felkällorna baserade på data från nedsmutsningsfaktorn och skymningsreläet (potentiella dagsljusmängden) uppskattas till ca 30 %. Utnyttjas den beräknade potentiella dagsljusmängden vid ett tröskelvärde mindre än 40 lux, motsvarar mängden dagsljusstimmar ca 67 % för båda dagsljussystemen. Om den beräknade potentiella dagsljusmängden används vid ett tröskelvärde högre än 40 lux motsvarar mängden dagsljusstimmar ca 54-57 % för Velux respektive Solatube med reservation för skillnader i ljusintensitetsområde vid mätningar med en högre provtagningsfrekvens.



Figur 19. Procentuell andel timmar med 80-100 % molntäcke mellan 0600 to 1800 under 2013-2014 visas i jämförelse med motsvarande molntäcke i medeltal mätt vid Falsterbo (55°38' nord, 12°82' öst) under 2002-2012.

Sensorernas mätområde valdes utifrån normala belysningsförhållanden. Med ett tröskelvärde om 40 lux arbetade sensorerna nära sin egen angivna noggrannhetsnivå. Detta kan ha medfört att sensorernas mätfel vid låga belysningsförhållanden kan blivit högre, likväl tycks registrerat mätdata ha en linjär respons till ökad belysningsstyrka i Appendix 1. Den inre reflektansen och nedsmutsningen av golv, väggar och tak har betraktats som likvärdiga till följd av regelbundna rengöringsintervall i de två stallarna.

4.3 Ljusfördelning och dagsljusfaktor

I traditionell kontorsmiljö är minimikravet på horisontell belysningsstyrka på arbetsytan 500 lux (CN. EN 15193). Sådana värden garanteras generellt av dagsljus, där dagsljusfaktorn är högre än eller lika med 5, medan elektrisk belysning kan behövas där dagsljusfaktorn ligger mellan 2 och 5. Bidrag från dagsljus betraktas som försumbar i områden med där dagsljusfaktorn är under 2 (CIE, 2003).

Medeldagsljusfaktorn var lägre än 1 i båda stallarna och på bägge höjderna (0 och 1,5 m). Med en låg ljusnivå som mål, och vetskap om att ljusstunnlar har en visuell ljusöverföring avgjort lägre än hos vanligt fönsterglas, var en låg dagsljusfaktor väntad. Trots att den normerade horisontella belysningsnivån var mycket lägre än belysningsstandarden för människor i kontorsmiljö (40 lux mot 500 lux), så kan dagsljusets bidrag anses relevant.

Det statistiska resultatet från mätningarna av dagsljusfaktorn tillsammans med figur 17 visar att ljusnivån på de olika höjderna varierar. För att finna orsaken till detta får vi betänka att mätpunkterna får sitt ljus från mer än en ljusstunnel och de boxavskiljande väggarnas placeringen i förhållande till ljusstunneln kan blockera ljusstrålarnas väg. Dessutom finns en skillnad mellan diffusorernas ljusdistribuerande egenskaper.

Dessa parametrar ger ett svar på varför dagsljusfaktorns värde inte varierar så mycket från golvnivå till 1,5 m över golvnivå om mätpunkterna är belägna långt ifrån ljusstunnlarna. Motsvarande variation är mycket högre om mätpunkterna är närmare

tunnlarna. Fastän mätpunkterna A, B, C är nästan symmetriskt belägna i jämförelse med punkterna G, H, I, finns det skillnader i dagsljusfaktor. Detta beror på närvaron av ett fönster, vilket skulle kunna påvisa tillförlitligheten i beräkningarna av dagsljusfaktor.

I allmänhet var ljusintensiteten och dagsljusfaktorn högst närmast ljustunnlarnas centrumlinje, precis ovanför djurens utfordringstråg och avtog med avståndet till centrumlinjen. Ljusintensiteten var lägst längst bort mot gödselytan invid inspektionsgången. Den isolerande övertäckningen över djurens viloplats minskade ljusnivån på golvnivå. Enligt Taylor (2006) föredrar djuren ljus vid ätplatsen, något mindre ljus på avträdesplatsen samt låg belysning på viloplatsen (2,4 lux) vilket inte helt överensstämde med vad grisarna erhållit här. Resultatet visar att diffusernas spridningsbild är viktig information för var ljustunneln placeras vid dagsljusplanering för grisar.

4.4 Överväganden vid planering

Elektricitet användningen för belysning för djurskötande personal i lantbruksbyggnader är väldigt kort och den huvudsakliga användaren är djuren. De erhållna resultaten från dagsljusmätningarna visar att förbrukningen av elektricitet för belysningsändamål i lantbruksbyggnader kan minskas för växande djur som slaktsvin, slaktkyckling och värphöns. Genom att kombinera ljustunnlar med dimningsbar belysning under perioder då dagsljusmängden är lägre kan förbrukningen av elektricitet minskas ytterligare. Med krav på högre inomhustemperatur inom fjäderfäproduktion skulle en energibesparingen genom diffust dagsljus från ljustunnlar, istället för via fönster med låga U-värden, kunna vara ännu mer förtjänstfull. Dagsljusets spektralfördelning kan dessutom vara positiv för visuell kontakt och kommunikation samt påverka fåglarnas fysiologiska system (Prescott et al., 2003).

Enligt Zhang et al. (2000) är solhöjden och graden av molnfri himmel nyckelparametrar för ljustunnlarnas prestationsförmåga. Av den anledningen är byggnader för djurproduktion särskilt lämpliga för låga solhöjder på norra halvklotet om de har en taklutning om 15-22° med kollektor mot söder, en ljustunnel med stort bredd-höjd förhållande, hög spekulär reflektans hos tunnelytor och kollektor med ett optiskt omriktningssystem.

En nackdel är att vi inte vet hur varaktigheten hos diffuser och tunnelytoras reflektans påverkas av de gaser som förekommer i stallarna. Ej heller vet vi hur ljustunnlarna fungerar ur brandsäkerhetssynpunkt om brand inträffar. För optimal användning av ljustunnlar krävs även uppgifter om ljusmängder och ljusfördelning under året som kan användas som planeringsunderlag för ett sammansatt ljussättnings-system. För att få fram dessa uppgifter bör goniofotometrisk undersökning utföras, dvs. mätning av vinkelspridningen hos diffust ljus som funktion av den infallande vinkeln som underlag för att beskriva optiska omriktningssystem i kollektor och diffuser. Dessa uppgifter skulle underlätta och förbättra möjligheterna att datorsimulera ljustunnlarnas funktion och effektivitet.

Även om mätåret varierade och delvis avvek från ett normalår under vinterhalvåret då minst dagsljusstimmar fångades (januari månad) kan det till största del sägas representera ett normalår. För slaktsvinen som producerades i stallarna på Odarlöv under

2013 och 2014 var anmärkningarna betydligt lägre än slakteriets medelvärde för samtliga slaktade grisar.

Baserat på den beräknade potentiella dagsljusmängden skulle ljusstunnlar för humant bruk kunna erbjuda en möjlig besparing om ca 55% i korridorer och toalettutrymmen under förutsättning att periodvis lägre dagsljusnivåer och kompletterande belysning kan accepteras då solen står lågt. Om 50 % av belysningselektriciteten skulle kunna sparas inom djurproduktion i lantbruket, så skulle det motsvara en minskning av 36-86 GWh eller 2 520 ton CO₂ varje år i Sverige (Hörndahl, 2007; Börjesson et al., 2010).

4.4 Slutsatser

Antal dagsljusstimmar var i medeltal under året 48 % för Velux och 55 % för Solatube. Solatubes ljusstunnelsystem levererade signifikant mer dagsljusstimmar jämfört med Velux. Den mest förekommande ljusintensitetsområdet i bägge stallarna var 0 -160 lux, vilket motsvarade ca 82 och 83 % av dagsljusstimmarerna hos Velux respektive Solatube. Skillnader erhöles i dagsljusfaktor för nivån 1,5 m över golvet. Solatube hade en mer homogen fördelning av dagsljusfaktorvärden (0,05-0,59), vilket tyder på en mer effektiv ljusspridning.

Antalet erhållna dagsljusstimmar kan på årsbasis ge en betydande energibesparing för slaktgrisar, slaktkyckling och värphöns genom ökad dagsljusanvändning i djurproducerande byggnader. För humant bruk kan ljusstunnlar erbjuda en energibesparingspotential framförallt i kombination med dimbar belysning om lägre belysningsnivåer kan accepteras periodvis i korridorer och i toalettutrymmen då solhöjden är låg.

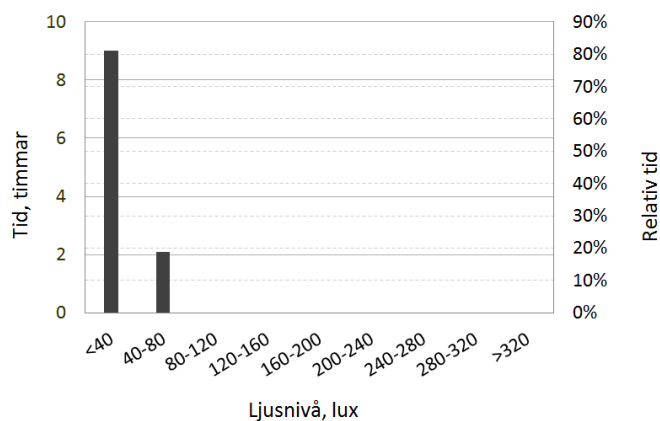
6 REFERENSER

- Ashkenazy, T., Einat, H., & Kronfeld-Schor, N. (2009). Effects of bright light treatment on depression- and anxiety-like behaviors of diurnal rodents maintained on a short daylight schedule. *Behavioral Brain Research*, 201(2), 343–346.
- Bruininx, E.M.A.M., Heetkamp, M.W., Bogaart, A., van der Peet-Schwering, C.M.C., Beynen, A.C., Everts, H., den Hartog, L.A., and Schrama, J.F.W. (2002). A prolonged photoperiod improves feed intake and energy metabolism of weanling pigs. *Journal of Animal Science*, 80 (7), 1736-1745.
- Börjesson, P., Tufvesson, L. and Lantz, M. (2010). Life Cycle Assessment of Biofuels in Sweden. Report 70, in Swedish. Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, ISBN 91-88360-96-2, Lund, Sweden.
- CEN. EN 15193 - Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting. Brussels; 2007; 78.
- Chandler, M. J., Smith, P. J., Samuelson, D. A. & Mackay, E. O. (1999). Photoreceptor density of the domestic pig retina. *Veterinary Ophthalmology*, 2, 179–184.
- CEC. (2001). Commission Directive 2001/93/EC of 9 November 2001 amending Directive 91/630/EEC: Laying down minimum standards for the protection of pigs. Brussels, Belgium: Commission of the European Communities.
- CIE. (2003). Standard, C., *Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky*. CIE S, 2003, 11.
- Danny, H., Ernest, K., Cheung, K., & Tam, C. (2010). An analysis of light-pipe system via full-scale measurements. *Applied Energy*, 87, 799–805.
- Dehoff, P. (2002). The impact of changing light on the well-being of people at work. In *Proceedings of Right Light*, 5 (pp. 374-351).
- Edmonds, I., Moore, G., Smith, G., & Swift, P. (1995). Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research & Technology*, 27, 27–35.
- Edström, M., Pettersson, O., Nilsson, L. och Hörndahl, T. (2005). Energi i jordbruket. JTI-Rapport. Lantbruk och Industri 342. JTI - institutet för jordbruk och miljöteknik. Uppsala.
- EIA. (2007). US Energy Information Administration. *International emissions data: Energy Related Carbon Emissions*. Available from <http://www.eia.doe.gov/environmental.html>.
- Gelatt, K. N. (Ed.), 1998. *Veterinary Ophthalmology*. 3rd ed. Lippincott, Williams and Wilkins, Philadelphia.
- Gentile, N., Håkansson, H., and M.-C. Dubois, (2013). “Lighting control systems in individual offices at high latitude: measurements of lighting conditions and electricity savings,” in *Proceedings of IE ECB’12*, Frankfurt, 2013, vol. 1, pp. 333–344.
- Figueiro, G. M. (2002). Daylight and Productivity - A Field Study. *Proceedings of 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Washington DC: American Council for an Energy-efficient Economy.
- Harteb Puleo, S., & Leslie, R. (1991). Some effects of sequential experience of windows in human response. *Journal of the IES*, 20(1), 91-99.
- Hörndahl, T. (2007). Energiförbrukning i jordbrukets driftsbyggnader. Rapport 145. Institutionen för Jordbrukets biosystem och teknologi. SLU. Alnarp.
- IEA. (2006). *Light's labour cost*. France: International Energy Agency (IEA) Publications.

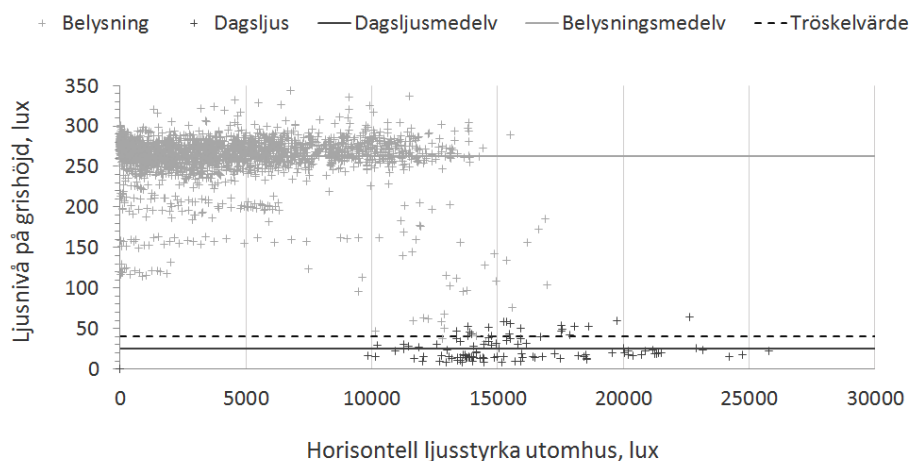
- Jeppsson, K-H., Nilsson, D., von Wachenfelt, H., Hörndahl, T. (2014). Lighting design in animal buildings with DiaLux and a quantitative assessment of lighting environment on pasture vs indoors for cattle. In Swedish, LTJ-report 2013:34, Alnarp.
- Kjellsson, E. (2002). *Solar heating systems for electricity heated houses. Report number U02:86*. Vattenfall AB.
- Kocifaj, M. (2009). Efficient tubular light guide with two-component glazing with Lambertian diffuser and clear glass. *Applied Energy*, 86, 1031–1036.
- Lo Verso, V., Pellegrino, A., & Serra, V. (2011). Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurements in a sun/sky simulator. *Solar Energy*, 85, 2789–2801.
- Nilsson, A. (2012). *Daylighting Systems: Development of Techniques for Optical Characterization and Performance Evaluation*. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology.
- Niekamp, S.R., Sutherland, M.A., Dahl, G.E., and Salak-Johnson, J.L. (2006). Photoperiod influences the immune status of multiparous gestating sows and their piglets. *Journal of Animal Science*, 84, 2072–2082.
- Minitab. (2013). Minitab® release 16.2.4 for Windows, Minitab Inc., State College, PA, USA.
- Mohelnikova, J. (2009). Tubular light guide evaluation. *Building and Environment*, 44, 2193–2200.
- Prescott, N. B., Wathes, C. M. & Jarvis, J. R. (2003). Light, vision and the welfare of poultry. *Animal Welfare*, 12, 269–288.
- Robertson, A., Hedges, R., & Rideout, N. (2010). Optimization and design of ducted daylight systems. *Lighting Research & Technology*, 42, 161–181.
- SAS Institute Incorp. (2011). Base SAS® 9.3 Procedures Guide. Cary, NC, SAS Institute Incorporated.
- SJV. (2014). Djurskyddsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd. Jordbruksverket. (In Swedish, Swedish Animal Welfare Agency, Swedish Board of Agriculture, SJVFS 2014:31 L100).
- Solatube International, Inc. (n.d.). Retrieved February 10, 2014, from www.solatube.com/commercial/product-catalog/brighten-up-series/index.php
- S Traberg-Broup, K. G. (2005). *Effektiv belysning i kontor og erhvervbyggeri, En undersøgelse in ni kontorbygninger. Report SBI 2005:06*. Horsholm, Denmark: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Swift, P. (2010). Splayed mirror light pipes. *Solar Energy*, 84, 160–165.
- Taylor, N., Prescott, N., Perry, G., Potter, M., Le Sueur, C. & Wathes, C. (2006). Preference of growing pigs for illuminance. *Applied Animal Behaviour Science* 96, 19–31.
- Tregenza, P., & Wilson, M. (2011). *Daylighting: Architecture and Lighting Design*. Routledge.
- Zhang, T., & Muneer, T. (2000). Mathematical model for the performance of light-pipes. *Lighting Research and Technology*, 32, 141–46.
- Zhang, X., Muneer, T., & Kubie, J. (2002). A design guide for performance assessment of solar light-pipes. *Lighting Research and Technology*, 34.

APPENDIX 1.

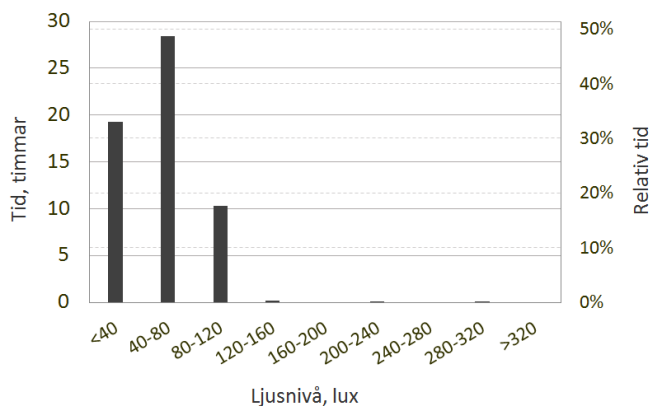
Uppmätta dagsljusnivåer i stallarna.



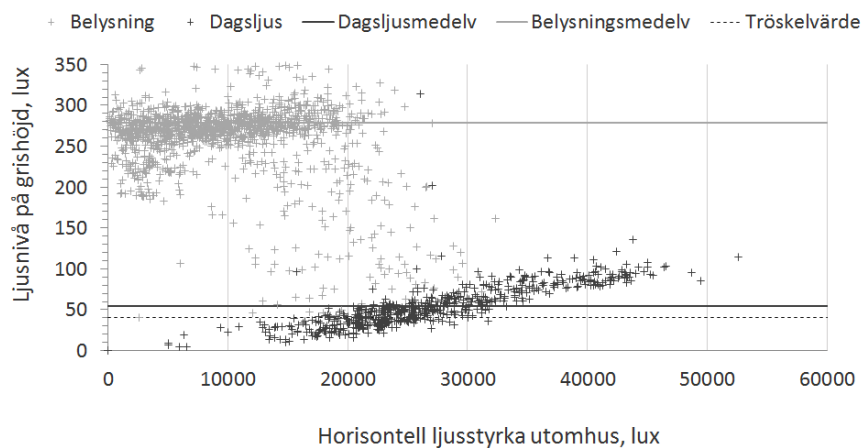
Figur 1. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under januari för stall 1, Velux.



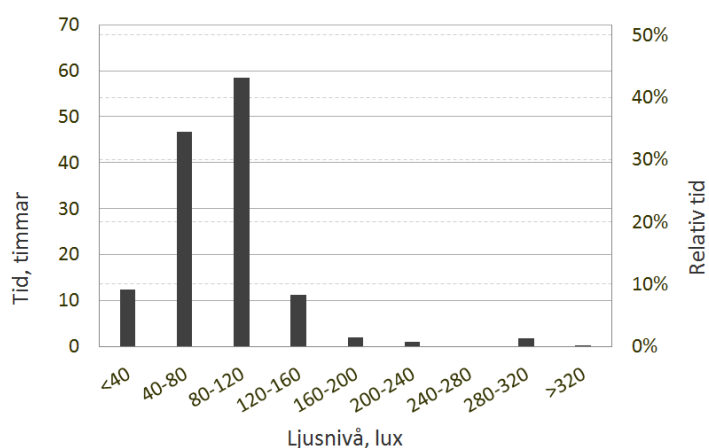
Figur 2. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under januari för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 25 respektive 263 lux för sensor v1 och s1.



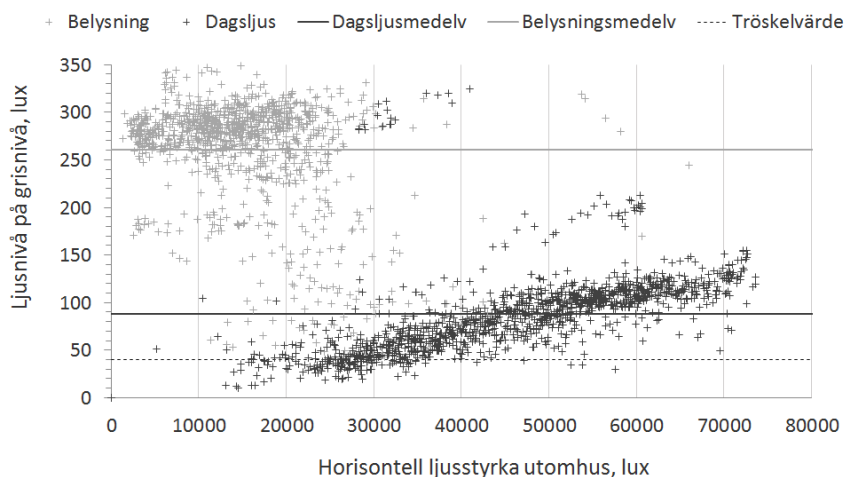
Figur 3. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under februari för stall 1, Velux.



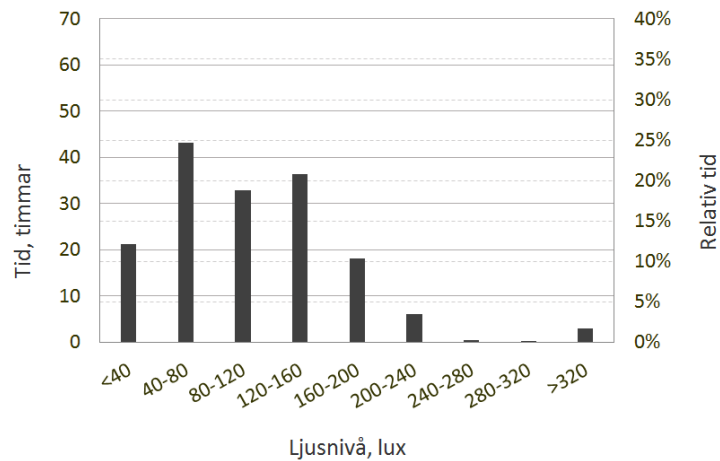
Figur 4. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under februari för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 55 respektive 279 lux för sensor v1 och s1.



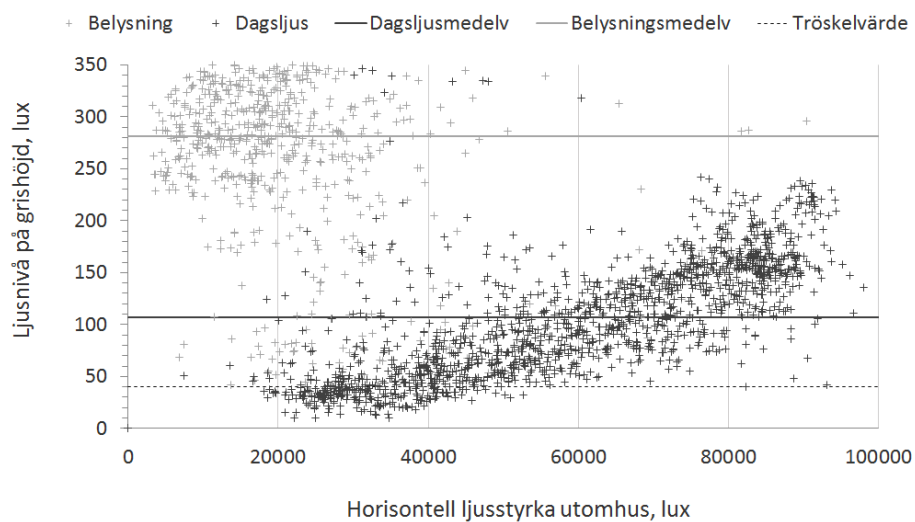
Figur 5. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under mars för stall 1, Velux.



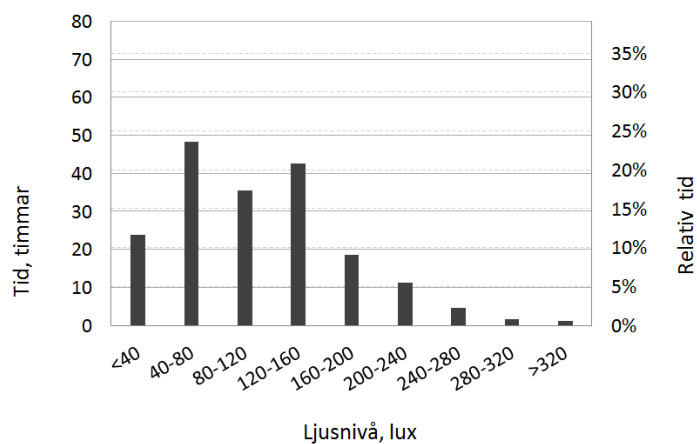
Figur 6. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under mars för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 88 respektive 261 lux för sensor v1 och s1.



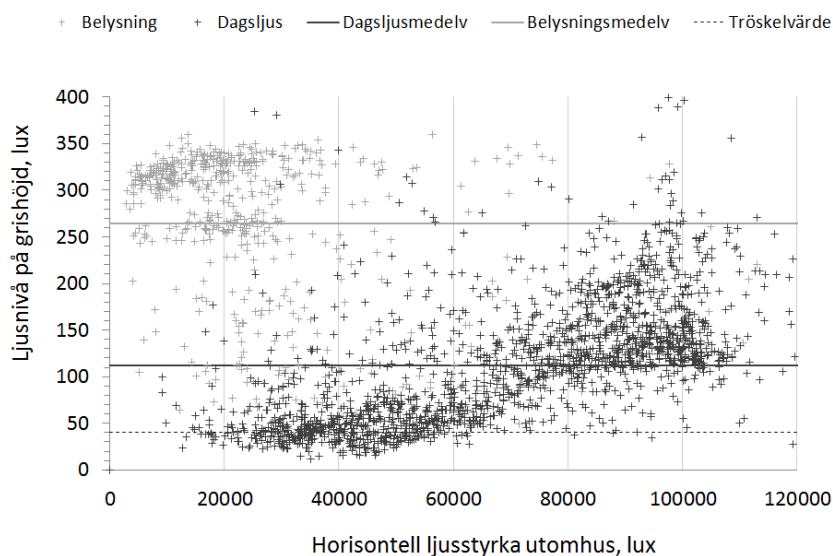
Figur 7. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under april för stall 1, Velux.



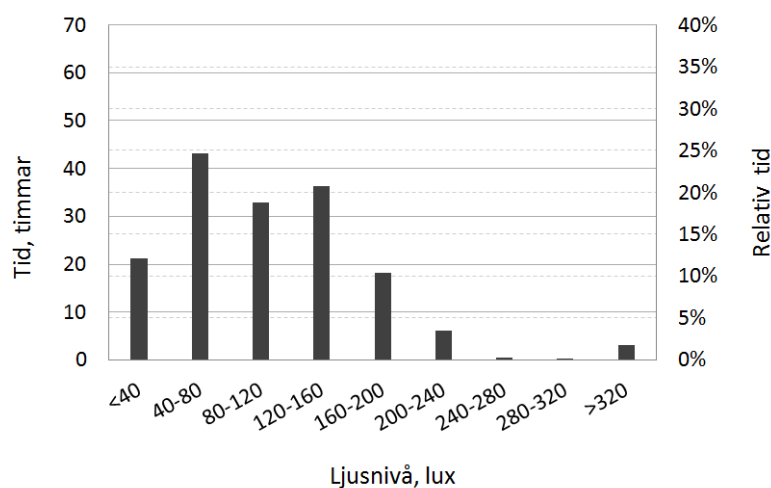
Figur 8. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under april för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 107 respektive 281 lux för sensor v1 och s1.



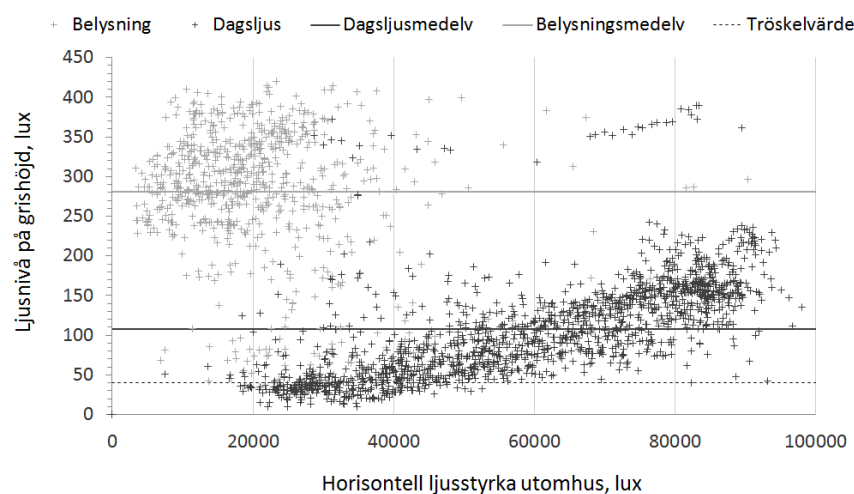
Figur 9. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under maj för stall 1, Velux.



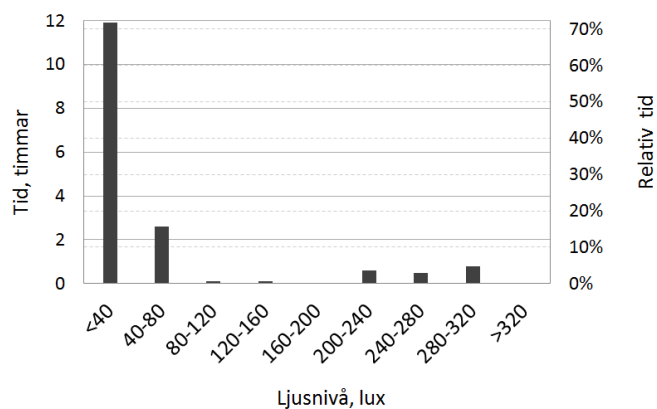
Figur 10. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under maj för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 112 respektive 265 lux för sensor v1 och s1.



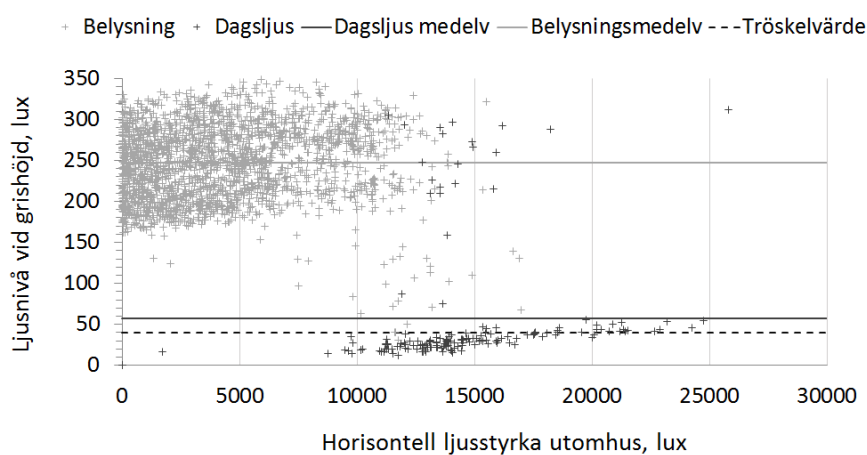
Figur 11. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under juni för stall 1, Velux.



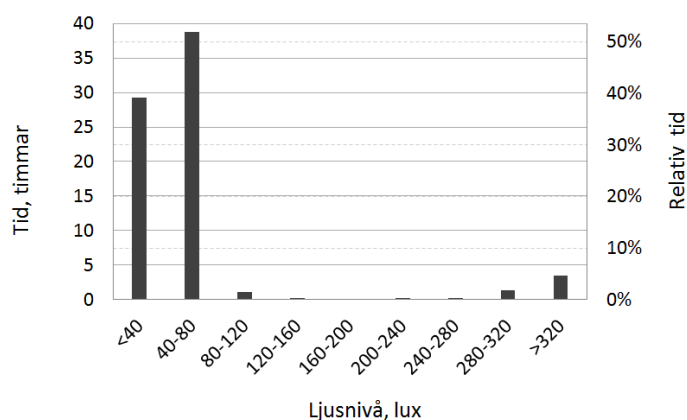
Figur 12. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under juni för stall 1, Velux. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 152 respektive 229 lux för sensor v1 och s1.



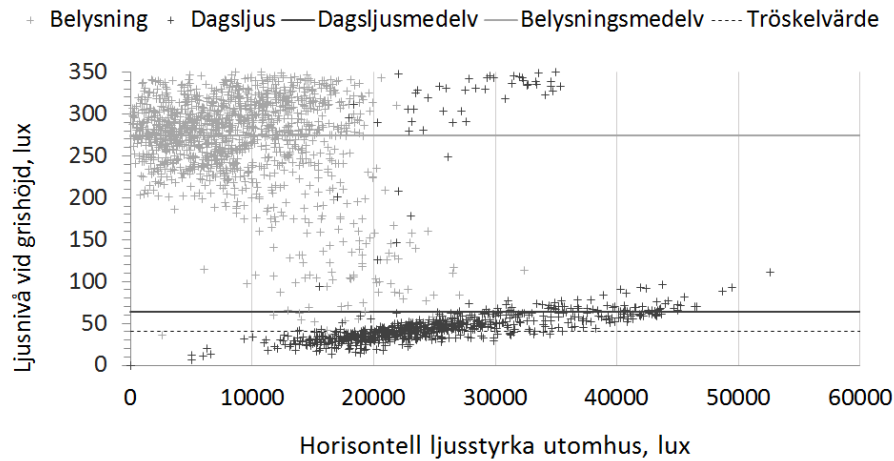
Figur 13. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under januari för stall 2, Solatube.



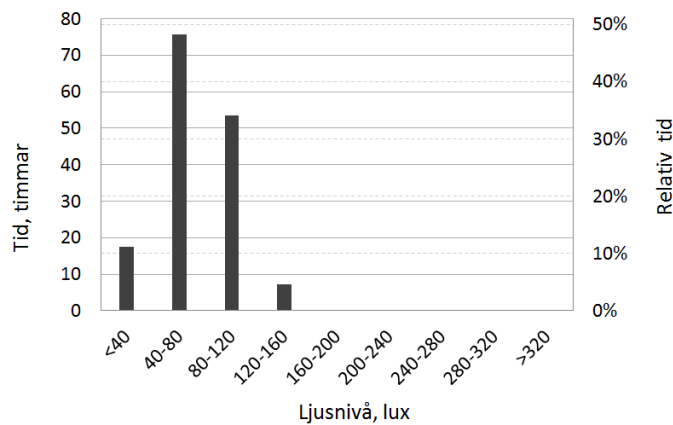
Figur 14. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under januari för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärdet var 58 respektive 248 lux för sensor v1 och s1.



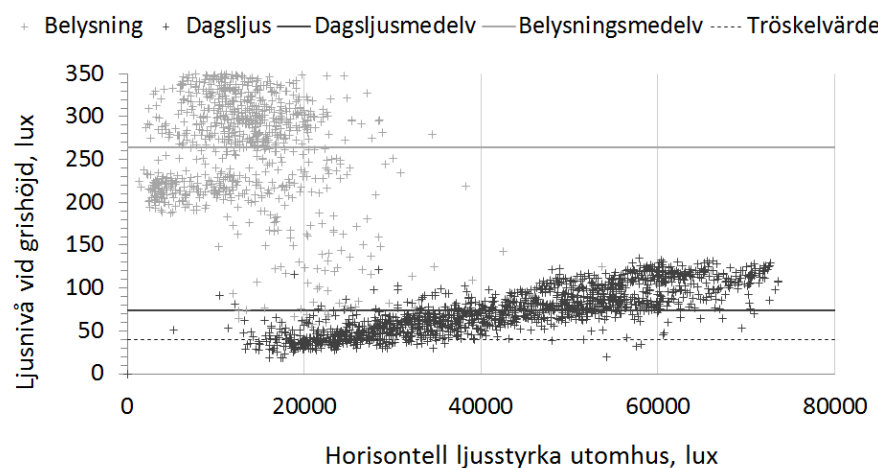
Figur 15. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under februari för stall 2, Solatube.



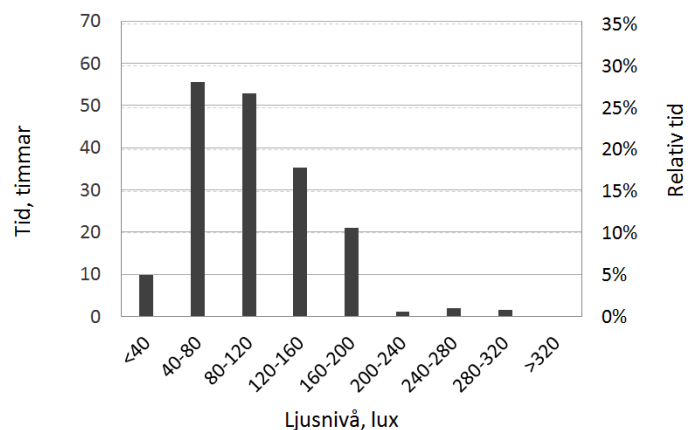
Figur 16. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under februari för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 64 respektive 274 lux för sensor v1 och s1.



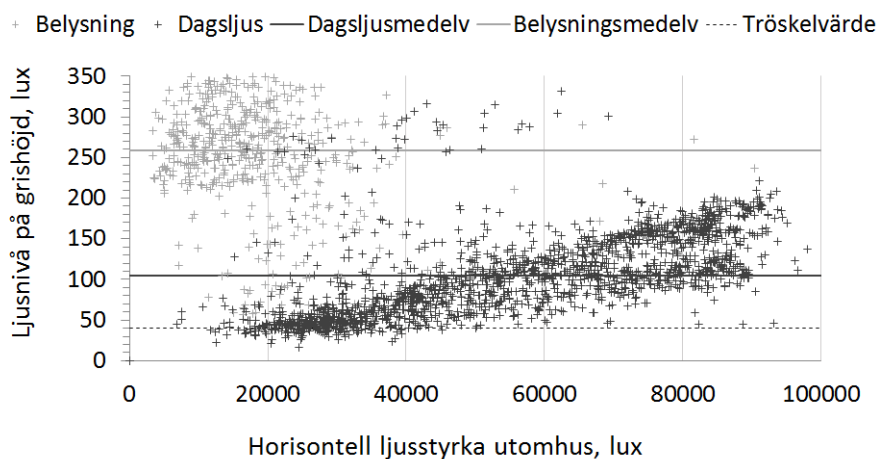
Figur 17. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under mars för stall 2, Solatube.



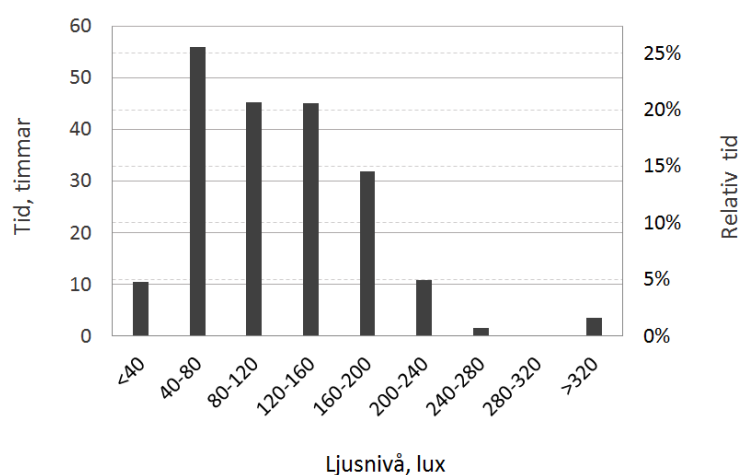
Figur 18. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under mars för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 74 respektive 265 lux för sensor v1 och s1.



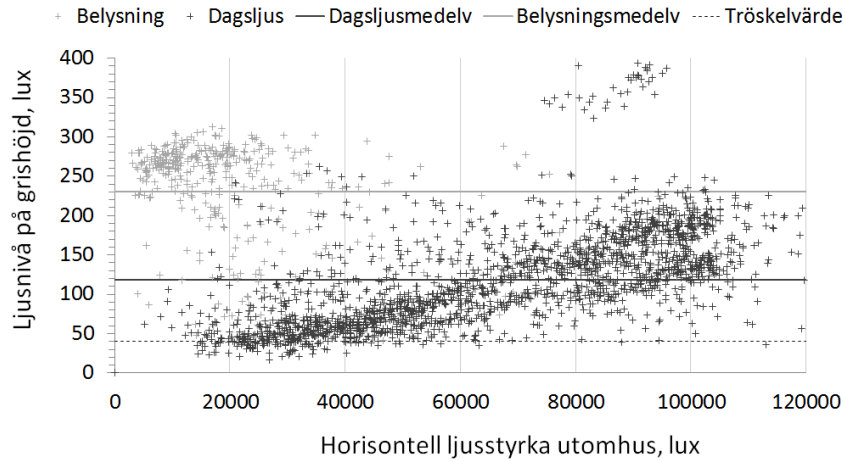
Figur 19. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under april för stall 2, Solatube.



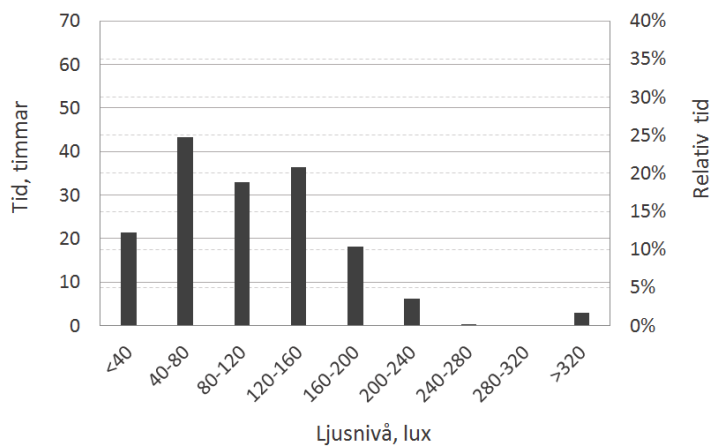
Figur 20. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under april för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 105 respektive 259 lux för sensor v1 och s1.



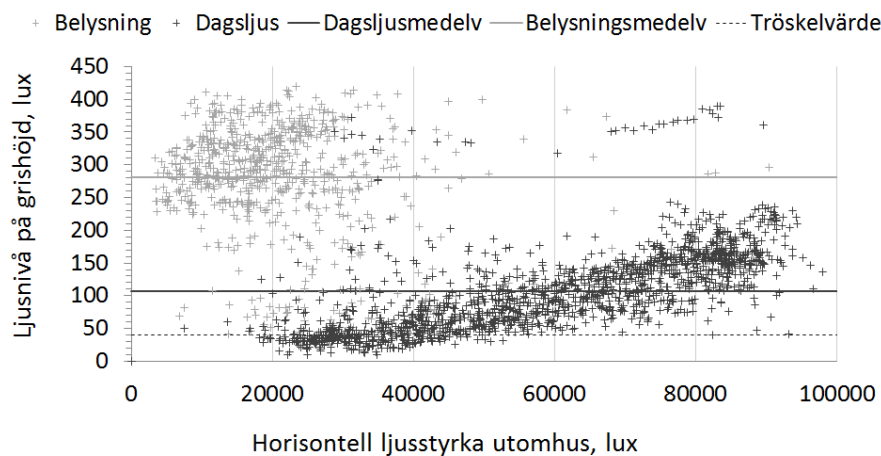
Figur 21. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under maj för stall 2, Solatube.



Figur 22. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under maj för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 118 respektive 231 lux för sensor v1 och s1.



Figur 23. Frekvensfördelning av dagsljusnivåer (lux) under juni för stall 2, Solatube.



Figur 24. Ljusstyrka vid grishöjd 0,7 m över golvet under juni för stall 2, Solatube. Dagsljus- och belysningsmedelvärde var 138 respektive 226 lux för sensor v1 och s1.